



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: Desarrollo de un sistema de monitorización de calidad del aire

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

AUTOR: Sergio Jerez Patiño

DIRECTORES: Francisco Vázquez Gallego y M. Eulàlia Parés Calaf

FECHA: 24 de Octubre del 2018

Título: Desarrollo de un sistema de monitorización de calidad del aire

Autor: Sergio Jerez Patiño

Directores: Francisco Vázquez Gallego y M. Eulàlia Parés Calaf

Fecha: 24 de Octubre del 2018

Resumen

Actualmente, la contaminación atmosférica es una realidad evidente en el mundo que supone un riesgo para la salud pública. Se intentan tomar medidas para reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y ampliar los servicios de alerta para proteger a la población durante los episodios de alta contaminación.

Una de las herramientas que se usan para la monitorización de la calidad del aire son los mapas de contaminación atmosférica. En Cataluña, estos mapas se hacen interpolando las medidas de las estaciones permanentes de la Generalitat repartidas a lo largo de todo el territorio. La distribución de estas estaciones no es homogénea y, por lo tanto, la resolución/calidad del mapa depende mucho de la proximidad o no a una de estas estaciones. En un futuro cercano estos mapas también tendrán en cuenta los datos proporcionados por el sistema de satélites europeo Copernicus, que ofrece una resolución de 7x7 km.

Si dispusiéramos de muchos más equipos de medida de concentración de gases, instalados en edificios o en vehículos de cero emisiones, como por ejemplos en bicicletas, podríamos densificar a muy bajo coste y desplegar una red de sensores que podría mejorar sustancialmente la resolución y la fiabilidad de los mapas de contaminación atmosférica en las zonas más pobladas.

En este proyecto hemos desarrollado un prototipo de un dispositivo para la medida de contaminantes del aire. El dispositivo de medida es ligero, de bajo coste, con un consumo eléctrico muy bajo, incluye un microcontrolador, distintos sensores, un sistema de posicionamiento y comunicaciones vía radio. Las medidas obtenidas se envían a un servidor que se almacenan en una base de datos permitiendo ver y analizar los datos en gráficas y mapas de calidad del aire.

Title: Development of an air quality monitoring system

Author: Sergio Jerez Patiño

Director: Francisco Vázquez Gallego and M. Eulàlia Parés Calaf

Date: October 24, 2018

Overview

Currently, air pollution is an obvious reality in the world that poses a risk to public health. Efforts are being made to reduce emissions of polluting gases into the atmosphere and to expand warning services to protect the population from episodes of high pollution.

One of the tools used to monitor the problem are the air pollution maps. In Catalonia, these maps are made by interposing the measurements of the permanent stations of the Generalitat distributed throughout the entire territory. The distribution of these stations is not homogeneous and, therefore, the resolution / quality of the map depends very much on the proximity or not to one of these stations. In the near future, these maps also take into account the data provided by Copernicus' European satellite system, which offers a resolution of 7x7 km.

If we had more gas measuring equipment, installed in buildings or vehicles with polluting emissions, such as bicycle models, they could be densified at a low cost and deploy a network of sensors that could affect the resolution and reliability of the pollution maps in the most populated areas.

In this project we have developed a prototype device for the measurement of air pollutants. The measurement device is lightweight, low cost, with a very low power consumption, includes a microcontroller, different sensors, a positioning system and radio communications. The obtained measurements are sent to a server that are stored in a database allowing to see and analyze the data in graphs and maps of air quality.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Descripción del trabajo realizado	3
1.4. Organización de la memoria	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Sistemas Embedded.....	5
2.2. Comunicaciones Radio	6
2.2.1. Sigfox	7
2.2.2. LoRaWan.....	9
2.2.3. NB-IoT	10
2.2.4. Comparativa	11
2.3. Sensores.....	12
2.3.1. Índices de la calidad del aire	12
2.3.2. Sensores de Gas	13
2.3.3. Sensores de Partículas	15
2.3.4. Sensores de Temperatura.....	15
2.3.5. Receptores GPS	16
2.4. Cloud Computing.....	16
2.4.1. Almacenamiento	16
2.4.2. Visualización.....	17
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DESARROLLADO	18
3.1. Arquitectura del Sistema.....	18
3.2. Hardware del Dispositivo de Medida	20
3.2.1. Microcontrolador	20
3.2.2. Sensores	20
3.2.3. Módulo de comunicación.....	28
3.2.4. Coste del Prototipo del Dispositivo de Medida	29
3.3. Software del Dispositivo de Medida	30
3.4. Tests.....	31
3.5. Almacenamiento en el Cloud	38
3.5.1. Diseño de base de datos.....	38
3.6. Visualización.....	39

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	43
4.1. Conclusiones del trabajo	43
4.2. Líneas de trabajo futuras	44
CAPÍTULO 5. GLOSARIO	45
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Mapa de cobertura Sigfox.....	7
Fig. 2.2 Arquitectura de la red Sigfox.....	8
Fig. 2.3 Bytes del paquete de Sigfox	8
Fig. 2.4 Mapa de cobertura LoRaWan.....	9
Fig. 2.5 Mapa de cobertura de la red NB-IoT de Vodafone	10
Fig. 3.1 Arquitectura del sistema	18
Fig. 3.2 Diagrama esquemático del prototipo.....	19
Fig. 3.3 Prototipo del dispositivo de medida.....	19
Fig. 3.4 Sensor de NO2.....	21
Fig. 3.5 Pines sensor de NO2.....	21
Fig. 3.6 Curva de estabilización del sensor de NO2.....	22
Fig. 3.7 Sensor de partículas.....	23
Fig. 3.8 Conexión y pines sensor de partículas.....	24
Fig. 3.9 Método de distinción entre partículas.....	24
Fig. 3.10 Prueba de funcionamiento del sensor de partículas	25
Fig. 3.11 Gráfica de calibración del sensor de partículas	25
Fig. 3.12 Modulo GPS.....	27
Fig. 3.13 Modulo de comunicaciones Sigfox.....	28
Fig. 3.14 Test de 1 hora: Concentración NO2.....	32
Fig. 3.15 Test de 1 hora: Concentración de partículas.....	32
Fig. 3.16 Test de 24 horas: Concentración NO2 vs Estación de referencia	33
Fig. 3.17 Primer Test de Coche.....	34
Fig. 3.18 Segundo Test de Coche	34
Fig. 3.19 Tercer Test de Coche.....	35
Fig. 3.20 Test de Estabilidad: dispositivo apagado 1 semana	35
Fig. 3.21 Test de Estabilidad: dispositivo apagado de 24 horas	36
Fig. 3.22 Campaña de medidas en la estación de Viladecans	37
Fig. 3.23 Campaña de medidas en la estación de Gavá	37
Fig. 3.24 Flujo del sistema de monitorización	38
Fig. 3.25 Gráfica de concentración de NO2.....	40
Fig. 3.26 Mapa de concentración de NO2.....	40
Fig. 3.27 Gráfica de temperatura.....	41
Fig. 3.28 Mapa de temperatura	41
Fig. 3.29 Gráfica de humedad	42
Fig. 3.30 Mapa de humedad.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Comparativa de tecnologías de comunicación para el caso de uso de este proyecto	11
Tabla 2.2 Comparativa LPWA	11
Tabla 2.3 Índices de la calidad del aire.....	12
Tabla 3.1 Precios de dispositivos	29

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La contaminación del aire se está convirtiendo en una de las principales amenazas para la sociedad, debido al alto impacto sobre la salud pública. Más allá de intentar reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, ahora mismo se está trabajando intensamente en los servicios de alerta a la población para proteger a las personas más vulnerables en episodios de alta contaminación.

Para resolver este problema, los mapas de contaminación del aire son muy importantes. Estos mapas se generan interpolando las medidas de las estaciones de referencia que están repartidas por el territorio, pero tienen el problema de que las estaciones no están distribuidas homogéneamente, y la resolución y calidad de las medidas en los mapas dependen de su proximidad a las estaciones de referencia.

Pero el precio de las estaciones es muy elevado (pueden llegar a unos 200.000€, debido a que los dispositivos y sensores de medición de alta gama son muy caros), por eso, el número de estaciones de referencia es muy reducido (62 en toda Cataluña).

En la tecnología de sensores de monitorización del aire se están realizando grandes avances, lo cual está facilitando el despliegue de redes inalámbricas, de sensores en edificios, vehículos de cero emisiones como bicicletas o autobuses. Existen varios proyectos de investigación experimental donde se ha probado con éxito un sistema capaz de monitorizar la calidad del aire, por ejemplo, los proyectos Clti-Sense-MOB [1], OpenSense [2], RESPIRA [3] o Bicycle Air Monitoring (BAM) [4].

Pero en todos estos proyectos, aunque se hayan obtenido resultados muy buenos, se utilizan sensores de alta gama (entre 500 € y 5.000€ por cada sensor de gas), y los sistemas de posicionamiento, o son costosos, o no tienen suficiente precisión en la ubicación exacta de la medida llegando a tener errores de posicionamiento superiores a 40 metros. Por lo tanto, sigue siendo realmente costoso desplegar cientos o miles de sensores para obtener un mapa de calidad del aire de precisión, y a día de hoy, es de vital importancia el desarrollo de un sistema de monitorización de calidad del aire basado en sensores de muy bajo coste [5].

1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de monitorización de la calidad del aire basado en una red de sensores inalámbricos, de bajo coste.

El sistema de monitorización de calidad del aire debe incluir los siguientes elementos funcionales:

- Un dispositivo de medida para la adquisición de las medidas de concentración de diferentes tipos de gases y partículas.
- El dispositivo de medida debe transmitir las medidas vía radio a la nube.
- Las medidas deben almacenarse en una base de datos en la nube para su posterior visualización y análisis en terminales móviles.
- El sistema debe incorporar un mecanismo que permita la correcta calibración de las medidas a partir de los datos proporcionados por las estaciones de referencia.

El sistema de monitorización de calidad del aire debe permitir el análisis de la concentración de los gases que más contaminan y que sean más tóxicos y perjudiciales para las personas y el medioambiente, como pueden ser el Dióxido de Nitrógeno (NO₂), el Dióxido de Azufre (SO₂) y el Ozono (O₃), además de la concentración de partículas en el ambiente (PM_{2,5} y PM₁₀). También es necesario medir la temperatura y la humedad del aire para saber cómo afecta a las medidas de concentración de gases en cada zona. Además, es necesario obtener la posición de los dispositivos de medida mediante GPS para determinar la posición de cada medida (geo-referenciación) y así poder representarlas en un mapa. Para el envío de medidas a la nube se integra un módulo de comunicaciones inalámbricas en el dispositivo de medida.

El dispositivo de medida debe tener una tasa de adquisición de medidas periódica, que se podrá configurar en función de las necesidades de los usuarios del sistema de monitorización.

El dispositivo de medida debe alimentarse con baterías, y se requiere que el tiempo de vida sea el más extenso posible, de unos 5 años o más según la batería, este tiempo de vida se puede llegar a conseguir debido al bajo consumo energético de los componentes del dispositivo de medida.

El coste del dispositivo de medida no debe superar los 300€, ya que se desea reducir el coste considerablemente respecto a los dispositivos de medida basados en sensores de alta gama.

1.3. Descripción del trabajo realizado

En este proyecto se ha desarrollado una prueba de concepto del sistema de monitorización de calidad del aire compuesto por los siguientes elementos:

- Un prototipo del dispositivo de medida formado por un microcontrolador, un sensor de NO₂, un sensor de partículas, un sensor de temperatura y humedad, un módulo receptor GPS, y un módulo de comunicaciones radio de largo alcance Sigfox.
- Un servidor basado en Node-RED que permite la recepción de los datos enviados por el dispositivo de medida y el almacenamiento en una base de datos InfluxDB.
- Una herramienta de visualización y análisis de medidas basada en Grafana.

Los pasos seguidos para la realización del proyecto se describen a continuación:

- 1) Se ha diseñado la arquitectura del sistema, para saber qué dispositivos tendremos que conectar y conseguir que el sistema funcione correctamente.
- 2) Uno de los factores clave del proyecto ha consistido en la selección de los componentes del dispositivo de medida (sensores, microcontrolador, módulo de comunicaciones radio, etc.), ya que tienen que ser de bajo coste, ligeros, de bajo consumo y que proporcionen cierta estabilidad y precisión en las medidas.
- 3) Se ha seleccionado la tecnología de comunicaciones radio adecuada para: (i) garantizar bajo consumo energético del dispositivo de medida, (ii) asegurar largo alcance entre el dispositivo de medida y las estaciones base o gateways de la red de acceso, y (iii) proporcionar un ancho de banda adecuado para la transmisión de datos desde el dispositivo de medida a la nube.
- 4) Se ha realizado el montaje del hardware del prototipo del dispositivo de medida y se ha desarrollado el software del microcontrolador, basado en un sistema operativo en tiempo real (TI-RTOS), para que realice las funcionalidades de adquisición de medidas y la transmisión de datos a la nube.
- 5) Se ha desarrollado el software del servidor basado en Node-RED y la configuración del software Grafana para la lectura de medidas de la base de datos y visualización.
- 6) Se han realizado una serie de tests, en estático y dinámico, para analizar las medidas obtenidas por el dispositivo y comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

1.4. Organización de la memoria

La memoria ha sido organizada de tal forma que se pueden distinguir claramente los bloques que componen el sistema de monitorización de calidad del aire.

En este capítulo se incluye la introducción de la memoria, donde se presentan la motivación y los objetivos del proyecto realizado. Además, se describe el trabajo realizado para conseguir una prueba de concepto del sistema de monitorización de calidad del aire.

En el capítulo 2, se presenta el estado del arte de las tecnologías relacionadas con el proyecto, es decir, se describen los sistemas “embedded”, los microcontroladores, los sistemas operativos en tiempo real (RTOS), los diferentes gases que afectan a la sociedad y el medioambiente, los últimos avances en tecnología de telecomunicaciones radio de largo alcance y bajo consumo, y las tecnologías de almacenamiento de datos en la nube y visualización de datos.

En el capítulo 3, se describe el sistema desarrollado, diferenciando todas las partes del sistema, como la arquitectura, el hardware y el software prototipo del dispositivo de medida y los tests realizados. Además en el capítulo 3 se describe la forma en que se almacenan y visualizan todos los datos obtenidos, para poder realizar un análisis de los resultados.

Finalmente, en el capítulo 4, se presentan las principales conclusiones que se han extraído de las primeras pruebas a las que se ha sometido el sistema. En este capítulo también se comentan posibles líneas futuras para mejorar el prototipo del dispositivo de medida.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo contiene el estado del arte de las tecnologías relacionadas con el proyecto, es decir, se presentan los diferentes gases de contaminación del aire, y los últimos avances en tecnología de telecomunicaciones radio de largo alcance y bajo consumo, tecnologías de almacenamiento de datos en la nube y visualización de datos.

2.1. Sistemas Embedded

Un sistema embedded [6] (encastado o empotrado) está formado por varios componentes electrónicos que se combinan para realizar una o algunas pocas tareas de manera coordinada en tiempo real. Al contrario que un ordenador personal que está diseñado para cubrir un amplio rango de necesidades. Un sistema embedded contiene un microcontrolador que incorpora un procesador, encargado de realizar las tareas, diversas memorias RAM y ROM para almacenar el programa y datos, y un reloj digital que se puede usar para definir tiempos y crear temporizadores. Además, tienen diversos puertos de entrada y salida con diferentes características como la UART o las conversiones DAC (Digital to Analog Converter) y ADC (Analog to Digital Converter).

El sistema embedded es fundamental para el desarrollo del dispositivo de medida ya que es el componente principal que procesa todas las operaciones. Hoy en día, los sistemas embedded van creciendo tecnológicamente, haciendo sistemas embedded más reducidos y potentes que nos ofrecen mayores recursos para utilizar en nuestros sistemas.

El software de los sistemas embedded puede estar basado en un sistema operativo en tiempo real (en inglés, Real Time Operating System, RTOS [7]), que permite cumplir tiempos de respuesta estrictos en la ejecución de las funcionalidades del sistema. Un RTOS permite el desarrollo de aplicaciones multitarea y ofrece una gran escalabilidad, de esta forma es más sencillo agregar diferentes tareas sin afectar a las existentes. Un RTOS se suele utilizar cuando se necesita implementar diversas tareas simultáneas con plazos de tiempo estricto. A cada una de estas tareas se le asigna una prioridad, aplicando la de mayor prioridad al tiempo más estricto. Las tareas pueden ser periódicas o aperiódicas, es decir, tareas que se repiten a una frecuencia determinada, o tareas que están inactivas hasta que ocurre un evento que la activa.

Para que las tareas estén sincronizadas y puedan acceder a variables compartidas o a componentes físicos (por ejemplo, periféricos del microcontrolador) se utilizan los semáforos. La función de un semáforo en un RTOS es restringir e impedir que una tarea se active para acceder a una misma variable o bus, hasta que no finalice la primera tarea no puede ejecutarse la segunda tarea.

2.2. Comunicaciones Radio

La selección de la tecnología de comunicaciones inalámbricas es muy importante, ya que debe proporcionar conectividad continua y fiable entre el dispositivo de medida y la nube.

Hay muchas diferencias en las distintas tecnologías de comunicaciones que hay en el mercado. Si consultamos algunos proyectos previos de sistemas de monitorización de calidad del aire proponen el uso de Bluetooth, Zigbee o Wifi, pero estas tecnologías de comunicación presentan desventajas en la cobertura, ya que ofrecen rangos de cobertura muy pequeños y los sensores fuera del rango no enviarían información. Esto hace que se necesiten múltiples puntos de acceso radio para asegurar la conectividad, con el consiguiente incremento en los costes de despliegue de infraestructuras.

Existen otras tecnologías de comunicaciones radio como las celulares, por ejemplo, 2G (GSM, GPRS), 3G (UMTS) y 4G (LTE), capaces de aumentar el radio de cobertura y enviar grandes cantidades de datos con un gran ancho de banda. Sin embargo, los módulos de comunicaciones basados en estas tecnologías tienen un consumo de energía muy elevado, esto hace que se necesiten baterías más grandes para aumentar el tiempo de vida de los dispositivos o el mantenimiento del dispositivo teniendo que hacer reemplazos de las baterías con mayor frecuencia.

Actualmente, se están introduciendo las tecnologías Low Power Wide Area networks (LPWA), que facilitan la implementación de los casos de uso del Internet of Things (IoT), y que tienen grandes ventajas respecto al resto de tecnologías.

Las tecnologías LPWA [8] están diseñadas para permitir las comunicaciones de largo alcance, están optimizadas para la transmisión de datos con una baja velocidad de transmisión y con un consumo muy bajo de energía. Los dispositivos conectados a una red LPWA podrían tener tiempos de vida de unos 10 años.

Principalmente, las redes LPWA se usan para aplicaciones en las que hay que transmitir periódicamente una cantidad de datos muy pequeña a larga distancia para poder minimizar la cantidad de estaciones base o puntos de acceso radio, utilizando una topología de red tipo estrella.

Sigfox y LoRaWan son dos ejemplos de tecnologías LPWA que trabajan en las bandas ISM (Industrial Scientific Medical) de 868 MHz en Europa y 915 MHz en USA libres de licencia.

Otra alternativa comercial de tecnología LPWA es NB-IoT (Narrow Band-IoT), desarrollada a partir de la tecnología estándar LTE de comunicación celular.

2.2.1. Sigfox

La red Sigfox permite recibir información de miles de millones de dispositivos. Nos ofrece una solución, en la que toda la complejidad de la red está en las estaciones base y no en los dispositivos. Así reducimos los consumos de energía y los precios de los dispositivos.

Sigfox está desplegado actualmente en 45 países, con una cobertura total de 4 millones de Km². Tiene un rango de cobertura de 30-50 Km en zonas rurales por cada estación base, y en zonas urbanas de 3 a 10 Km debido al mayor número de obstáculos e interferencias.

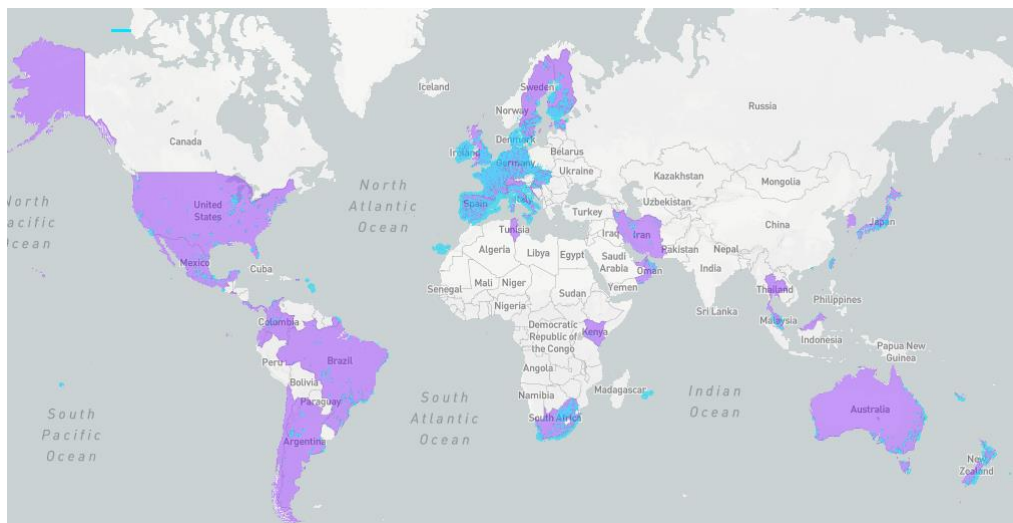


Fig. 2.1 Mapa de cobertura Sigfox

Se utiliza en aplicaciones que requieran de poca cantidad de datos a transmitir, por tanto, se reduce el consumo del dispositivo y se consigue mayor duración de la batería y tiempos más largos de vida.

La arquitectura de la red Sigfox se divide en 4 bloques:

- **Objects:** son los dispositivos equipados con sensores y con un módulo de comunicaciones Sigfox.
- **Sigfox stations:** estaciones base que nos ofrecen conectividad a la red.
- **Sigfox Cloud:** es la nube donde se almacenan los datos enviados por los dispositivos. El Sigfox Cloud incluye una plataforma denominada Sigfox backend que permite la gestión de los dispositivos conectados. A través del Sigfox backend se puede configurar el reenvío de datos vía HTTP a los servidores del usuario final.
- **Customer IT:** son los servidores o aplicaciones de usuario final, donde se visualizan y gestionan los datos.



Fig. 2.2 Arquitectura de la red Sigfox

Como se ha comentado, la tecnología Sigfox permite transmitir un volumen de datos muy limitado. La payload máxima que podemos enviar en un mensaje de subida (UPLINK) es de 12 bytes, y en un mensaje de bajada (DOWNLINK) de 8 bytes. Cada mensaje enviado es retransmitido 3 veces en frecuencias distintas, para conseguir una mayor robustez y evitar colisiones con otras transmisiones simultaneas. Sigfox ofrece una tasa de transmisión de 100 bps (Europa) y 600 bps (América del Norte). El tiempo de transmisión de un mensaje de datos es de 6 segundos.

El paquete de datos se compone de Preámbulo (4 bytes) + Header (8 bytes) + CRC (2 bytes) + Payload (máximo 12 bytes). La longitud total máxima de un mensaje es de 26 bytes.

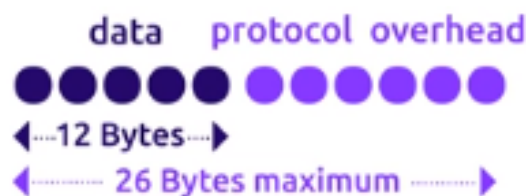


Fig. 2.3 Bytes del paquete de Sigfox

Además, Sigfox impone unas restricciones en el número de mensajes que se pueden enviar a través de la red, donde cada dispositivo sólo puede enviar un máximo de 140 mensajes al día, con un límite de 6 mensajes por hora. Esto es debido a las regulaciones radio en el uso del espectro radioeléctrico ya que es una banda libre de licencia (868 MHz), en la que se puede utilizar el 1% de la banda en un tiempo de 1 hora.

Para más información sobre Sigfox consultar referencia [9].

2.2.2. LoRaWan

LoRaWan [10] es una tecnología de comunicaciones para redes LPWA, diseñada para comunicaciones de larga distancia y dispositivos con bajo consumo de energía que envíen poca cantidad de datos a bajas velocidades de transmisión.

LoRaWan tiene cobertura en distintas zonas del territorio como por ejemplo, Canadá, Estados Unidos, Europa y Australia. Actualmente, en la India se están realizando trabajos de investigación y desarrollo donde tendrán cobertura a finales de 2019 [11].



Fig. 2.4 Mapa de cobertura LoRaWan [11]

En Europa, LoRaWan utiliza la banda 868 MHz (bandas ISM), que son bandas de uso libre pero limitadas en tiempo y potencia de transmisión. Tienen un rango de cobertura de unos 15 Km en zonas rurales y unos 5 Km en áreas urbanas. Las velocidades de transmisión se pueden configurar en función del rango de cobertura que se necesite.

Es posible tener comunicaciones bidireccionales debido a que tienen un enlace simétrico, pero LoRaWan y Sigfox están pensadas para aplicaciones donde sólo se requiera el enlace ascendente (UPLINK), es decir, del dispositivo a las estaciones base.

LoRaWan permite que un usuario pueda realizar el despliegue de gateways LoRaWan, a diferencia de Sigfox que funciona como una operadora y se encarga del despliegue de estaciones base y de su mantenimiento.

2.2.3. NB-IoT

NB-IoT [12] es un tipo de tecnología LPWA que ha sido desarrollada a partir de la tecnología estándar LTE de comunicación celular. NB-IoT opera en espectro con licencia y de uso exclusivo. NB-IoT ofrece optimizaciones respecto a LTE como la reducción de coste, consumo energético y complejidad de los dispositivos, soporta más números de dispositivos por celda y amplía el rango de cobertura mejorando el link Budget en 20 dB. Además, NB-IoT puede coexistir con GSM/GPRS y LTE.

En España, Vodafone ya ofrece cobertura y Telefónica está empezando a realizar despliegues. También se ofrece servicio en otras zonas de Europa [13].



Fig. 2.5 Mapa de cobertura de la red NB-IoT de Vodafone [13]

NB-IoT ha sido desarrollada para permitir comunicaciones eficientes, de bajo consumo, que requieren transmitir pocos datos en periodos de tiempo largos y para dispositivos que estén desplegados de forma masiva.

Los dispositivos NB-IoT dependen de la cobertura 4G, por lo que funcionan bien en interiores y en áreas urbanas densas.

El ancho de banda ofrecido por NB-IoT es de 180 KHz y la transmisión de mensajes es similar a Sigfox y LoRaWan, pero con una velocidad de transmisión superior (250 Kbps). El tiempo de vida de los módulos que utilizan la tecnología NB-IoT puede llegar a los 10 años.

Una de las desventajas de la tecnología NB-IoT es que la latencia en la transmisión de datos es alta, de unos 1.6 a 10 segundos, pero según en qué aplicaciones este tiempo no supone ningún problema.

2.2.4. Comparativa


Como se ha comentado, hay varios tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas disponibles en el mercado. Pero se tiene que utilizar la más adecuada para el desarrollo del sistema de monitorización de calidad del aire.

Tabla 2.2.1 Comparativa de tecnologías de comunicación para el caso de uso de este proyecto

	Bluetooth, Zigbee o Wifi	2G (GSM, GPRS), 3G (UMTS) y 4G (LTE)	LPWA
Cobertura	✗	✓	✓
Puntos de acceso	✗	✓	✓
Consumo energético	✓	✗	✓

En este proyecto se ha decidido utilizar Sigfox, ya que disponíamos de un módulo de comunicaciones, y es una tecnología que se adapta al sistema, pero deberíamos considerar si es la más eficiente. Al comparar con otras tecnologías como NB-IoT, comprobamos que Sigfox es más limitada en diferentes ámbitos. En la siguiente tabla, se muestran las principales diferencias entre la tecnología Sigfox y la tecnología NB-IoT.

Tabla 2.2.2 Comparativa LPWA

	 sigfox	NB-IoT
Disponible	Actualmente	Actualmente
Cobertura	160 dB	164 dB
Espectro (Canal)	Sin licencia 900 MHz (100 Hz)	Licencia 800-900 MHz (180 KHz)
Rango	< 10 Km	<15 Km
Restricciones de envíos	Si (140 mensajes/día o 6 mensajes/hora)	No
Velocidad de transmisión (Downlink)	100 bps (máximo 8 bytes)	<250 Kbps
Velocidad de transmisión (Uplink)	100 bps (máximo 12 bytes)	<250 Kbps
Vida de la batería	> 10años	> 10años
Coste	20 €	10 €
Seguridad	Bajo	Muy alto

Como vemos, Sigfox ofrece características parecidas o inferiores a las que ofrece NB-IoT. Sigfox está disponible actualmente y sigue creciendo a diferentes países, aunque en España ya ofrece cobertura desde 2014. NB-IoT se está empezando a desplegar con Telefónica, y Vodafone ya ofrece servicio en buena parte de Europa. Ambas tecnologías ofrecen rangos de cobertura, costes y vida de la batería parecidos.

Las principales diferencias están en el uso del espectro ya que Sigfox no necesita licencia y NB-IoT necesita licencia, en la velocidad de transmisión, ya que NB-IoT permite velocidades de transmisión mayores, y no tiene restricciones de mensajes, ya que Sigfox está limitada a 140 mensajes por día y 6 mensajes por hora, debido a las regulaciones radio en el uso del espectro radioeléctrico.

2.3. Sensores

En los siguientes apartados se introducen los conceptos de los distintos tipos de sensores como los que miden concentración de gas, concentración de partículas, temperatura, humedad y recepción de GPS.

2.3.1. Índices de la calidad del aire

Para determinar los niveles de contaminación de una forma sencilla se le asocia un valor adimensional que se define en la legislación actual. Este valor es un índice de calidad del aire (ICA) que pertenece a una escala que muestra de forma clara la calidad del aire y facilita la comprensión de la información a la población [14].

Tabla 2.3.3 Índices de calidad del aire

Índice	Calidad del aire	Salud
0-50	Bueno	La calidad del aire es buena y no supone riesgo para la salud
51-100	Moderado	La calidad del aire es aceptable
101-150	Poco saludable para grupos sensibles	La calidad del aire puede afectar a grupos sensibles, como personas enfermas, niños y ancianos
151-200	Poco saludables	Cualquier persona puede tener problemas de salud
201-300	Dañina para la salud	Problemas graves de salud. Se debe usar para advertencia de emergencia sanitarias
300-500	Peligroso para la salud	Muy peligroso para toda la población. Se debe usar para alertas sanitarias

Para calcular el factor de cálculo de cada contaminante, se asocia el valor 100 al valor límite establecido por cada contaminante.

Para el gas NO₂ el límite de concentración en 1 hora es de 200 µg/m³, por lo tanto el factor es $100/200=0.5$.

Para el gas SO₂ el límite de concentración en 1 hora es de 350 µg/m³, por lo tanto el factor es $100/350=0.286$. Y el límite diario es de 125 µg/m³, su factor es $100/125=0.8$.

Para el gas O₃ el límite de concentración en 1 hora es de 180 µg/m³, por lo tanto el factor es $100/180=0.556$. Y el límite en 8 horas es de 120 µg/m³, su factor es $100/120=0.833$.

Para las partículas en suspensión el límite de concentración diario es de 50 µg/m³, por lo tanto el factor es $100/50=2$. Y un límite en 1 hora de 150 µg/m³, su factor es $100/150=0.67$.

Cuando se obtenga una medida de cada contaminante en µg/m³, se multiplica por el factor de cálculo para poder representarlo en el ICA [15].

2.3.2. Sensores de Gas

A continuación veremos los gases más contaminantes y peligrosos para el medioambiente. Para poder saber cuál es la calidad del aire necesitaremos sensores, que nos ayudarán a determinar cuál es la concentración de cada gas.

Consultar referencias [16] y [17] para más información sobre los gases más contaminantes.

2.3.2.1. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Es un gas de color amarillento con un fuerte olor a acre, es decir, un olor desagradable intenso y picante, que penetra en las vías respiratorias. Es muy tóxico e irritante. La exposición a niveles bajos (entre 80 y 200 µg/m³) provoca irritación en los ojos y garganta, dolores de cabeza, náuseas y pérdidas graduales de la fuerza. Y la exposición a niveles altos (superiores a 200 µg/m³) provoca edemas pulmonares e incluso la muerte.

La fuente principal son los motores diésel que emiten NO, se oxidan cuando entran en la atmósfera y se convierte en NO₂. Otras fuentes son las centrales térmicas, centrales de energía a carbón, industrias manufactureras y plantas de tratamientos de aguas residuales. Y de forma natural en erupciones e incendios forestales.

Para poder hacer la selección del sensor NO₂, se analiza los diferentes tipos que hay disponibles. Podemos ver que hay dos tipos de sensores diferentes, los analógicos y los digitales.

Los sensores analógicos convierten la salida de señal de corriente lineal del sensor en una señal de voltaje lineal, donde se hace la conversión analógico-digital con el microcontrolador y se realiza el mapeo del valor digital al nivel de concentración de gas.

2.3.2.2. *Dióxido de azufre (SO₂)*

Es un gas irritante, incoloro y con un olor asfixiante. Se empieza a percibir por el olfato humano entre 0,3 a 1,4 ppm y la concentración máxima permitida en zonas de trabajo es de 2 ppm. Por lo tanto es un gas tóxico tanto para las personas como las plantas.

Este gas comporta un grave riesgo para la salud y afecta sobre todo a las vías respiratorias y pulmones, causando inflamaciones, problemas para respirar, irritación en los ojos, etc.

Es el principal causante de la lluvia ácida, se libera de forma natural en erupciones volcánicas y en muchos procesos de combustión como el carbón, el petróleo, el diésel o el gas natural.

Actualmente se están reduciendo las emisiones debido a la sustitución de combustibles con altas cantidades de azufre, como la sustitución del carbón por el gas natural.

También existen distintos tipos de sensores, los analógicos y los digitales que tienen las mismas características y funcionamiento que los sensores de NO₂ explicados en el apartado anterior.

2.3.2.3. *Ozono (O₃)*

Es un gas invisible, incoloro y de olor agradable, pero que se convierte en un grave problema medioambiental cuando la concentración aumenta. Se recomienda no superar los 120 µg/m³ en promedio de 1 hora y en media de 8 horas los 120 µg/m³ y una concentración máxima de alerta de 240 µg/m³, ya que puede afectar a la capacidad respiratoria de las personas y es perjudicial para el crecimiento de las plantas.

Este gas no tiene un foco emisor sino que se produce por la acción de los rayos del sol sobre los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, por lo tanto en épocas de calor aumentan los niveles de este contaminante.

Los sensores disponibles también son analógicos o digitales con las mismas características y funcionamiento que el sensor de NO₂.

2.3.3. Sensores de Partículas

Las partículas en suspensión son pequeños sólidos que están dispersos en el aire y que debido a su tamaño no se depositan en el suelo, sino que pueden permanecer en suspensión en el aire y recorrer grandes distancias.

Las partículas se diferencian por su tamaño, las de PM10 tienen un tamaño menor de 10 μm y las de PM2,5 son la de menos de 2,5 μm .

Se pueden originar de forma natural o debido a la actividad humana. Las de tipo natural sus principales fuentes de origen son el polvo que proviene de la descomposición de rocas o minerales, actividades volcánicas, desiertos, polen, etc. Las procedentes de la actividad humana son más abundantes, se producen en actividades industriales, canteras, mineras, etc. Y por las combustiones de motores, así como también el desgaste de pastillas de freno y de neumáticos.

Se establece un límite diario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un límite horario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, si se sobrepasan estos límites puede llegar a ser perjudiciales para la salud de las personas.

Las partículas más pequeñas son más peligrosas que las grandes ya que van penetrando en nuestro organismo llegando a ser muy perjudicial para la salud. Pueden provocar deterioro del sistema respiratorio y cardiovascular, cáncer de pulmón, enfermedades obstructivas, etc.

Además también presentan efectos nocivos ambientales, ya que pueden absorber y emitir radiación y ser el medio para reacciones químicas.

Los sensores disponibles en el mercado tienen distintas sensibilidades y tamaños. Se basan en que las partículas se reflejan en un LED para detectar y contar partículas de cada tamaño, se analiza la luz reflejada para calcular los niveles de concentración.

2.3.4. Sensores de Temperatura

La temperatura es una magnitud que expresa el grado o nivel de calor del ambiente [18]. La unidad de medida que utilizamos serán los grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). La temperatura también es un factor clave para la concentración de otros gases, ya que la temperatura del ambiente puede afectar a la medida de concentración de gases.

Además, también medimos valores de humedad relativa, que nos dice el tanto por ciento de cantidad de vapor de agua que se encuentra presente en la atmosfera respecto a la máxima que puede tener a esa temperatura [19].

2.3.5. Receptores GPS

El GPS (Sistema de Posicionamiento Global), permite determinar la posición con mucha precisión en toda la Tierra. Las coordenadas GPS están formadas por dos componentes que son la latitud y longitud, que nos permiten saber el lugar en la superficie de la tierra [20].

Existen varios tipos de receptores, para el caso con espacios abiertos y que tengan buena visibilidad al cielo y los satélites, los receptores GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) son buenos para proporcionar un posicionamiento preciso y fiable. Pero en zonas más limitadas y que haya problemas de visibilidad como por ejemplo en caminos y calles más estrechas estos receptores tendrían problemas. Existen otros sistemas que fusionan los receptores GNSS e INS (Sistema Inercial de Navegación) que resolverían ese problema.

2.4. Cloud Computing

En este apartado se introducen los métodos más eficientes para el almacenamiento de los datos en la nube y para visualizar las medidas del sistema de monitorización de calidad del aire.

La forma de enviar los datos y qué tecnología es la más apropiada se han comentado en el apartado 2.2. Cuando una estación base Sigfox recibe un paquete de datos procedente de un dispositivo de medida, la estación base reenvía el paquete al Sigfox backend, que finalmente lo transmite al servidor del usuario usando el protocolo HTTP.

2.4.1. Almacenamiento

Un buen diseño de base de datos con la tecnología apropiada aporta calidad y eficiencia al proyecto.

Hay dos tipos de bases de datos que se han tenido en cuenta para almacenar los datos. Las bases de datos relacionales (SQL, en inglés Structured Query Language) son las más utilizadas en la actualidad para implementar bases de datos ya planificadas y que permiten hacer relaciones entre los datos almacenados en las tablas. Y las bases de datos no relacionales (Non-SQL) no tienen un identificador que sirva de relación entre un conjunto de datos y otros. Además no tienen un esquema exacto de lo que se va a almacenar por lo que sería más fácil realizar ampliaciones.

En este proyecto se propone utilizar una base de datos estructurada de series de tiempo, similar a las bases de datos relacionales, ya que almacenan los datos ordenados cronológicamente que miden el valor de una variable a lo largo del

tiempo. Influx DB es una de las opciones más conocidas y son una solución buena para el almacenamiento rápido de medidas adquiridas y el análisis en tiempo real del sistema de monitorización de calidad del aire.

Se dispone de un servidor Node-RED, que permite crear de manera sencilla un flujo para tener el servicio de almacenar los datos en la base de datos.

2.4.2. Visualización

Es importante saber que método de visualización vamos a utilizar, ya que los datos a mostrar pueden ir dirigidos a personas con diferentes fines, como por ejemplo a ciudadanos que sólo estarían interesados en saber las concentraciones de contaminación, pero esperan una herramienta que sea fácil de usar e intuitiva basadas en web o en aplicaciones móviles. Por otra parte, también pueden ir destinadas a personal técnico que necesitan crear sistemas de alertas o gestionar el tráfico, por eso esperan herramientas de visualización basadas en Sistema de Información Geográfica (GIS).

Por lo tanto, usamos la plataforma Grafana para mostrar los datos en la interfaz web, que nos permite visualizar los valores de las medidas en gráficas y mapas y la posibilidad de exportar los datos a través de la base de datos.

.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DESARROLLADO

Este capítulo contiene la descripción del sistema desarrollado, diferenciando el desarrollo en la arquitectura del sistema, el hardware y software del dispositivo de medida y la forma de almacenamiento y visualización de los datos. También incluye los tests realizados.

3.1. Arquitectura del Sistema

La siguiente figura muestra la arquitectura del sistema de monitorización de calidad del aire desarrollado en este proyecto, incluyendo todos los elementos que forman el sistema desde la adquisición de las medidas en el prototipo del dispositivo de medida, envío al Cloud, almacenamiento de medidas y visualización.

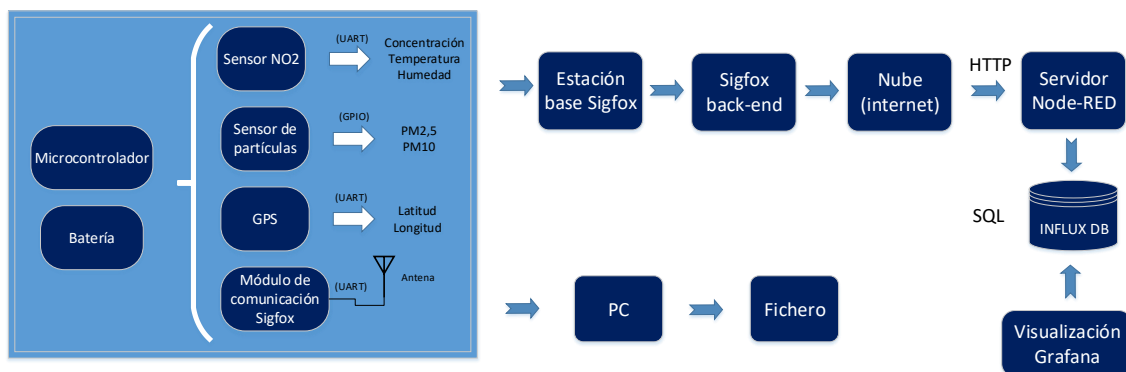


Fig. 3.1 Arquitectura del sistema

Todos los dispositivos, como los sensores, GPS, módulo de comunicación y batería forman parte del prototipo, donde cada uno de ellos adquiere una medida.

Al comenzar del proyecto, cuando ya se adquirirían medidas de los sensores, el sistema permite conectar un PC para almacenar localmente las medidas adquiridas por el prototipo. Pero una vez avanzado el proyecto, y funcionaban las comunicaciones inalámbricas, se deshabilitó esta forma de analizar los datos.

Una vez se adquieren las medidas a través de los sensores del prototipo del dispositivo de medida, se envían a través del módulo de comunicaciones a Sigfox, el cual las reenvía la dirección IP de la máquina virtual donde está instalado el servidor Node-RED, que se encarga de almacenar los datos en Influx-DB, que es una base de datos de series de tiempo. Con Grafana se puede acceder a la base de datos y visualizar las medidas para poder analizarlas de forma más eficaz con gráficos y mapas.

En la siguiente figura se muestra el diagrama esquemático del prototipo del dispositivo de medida:

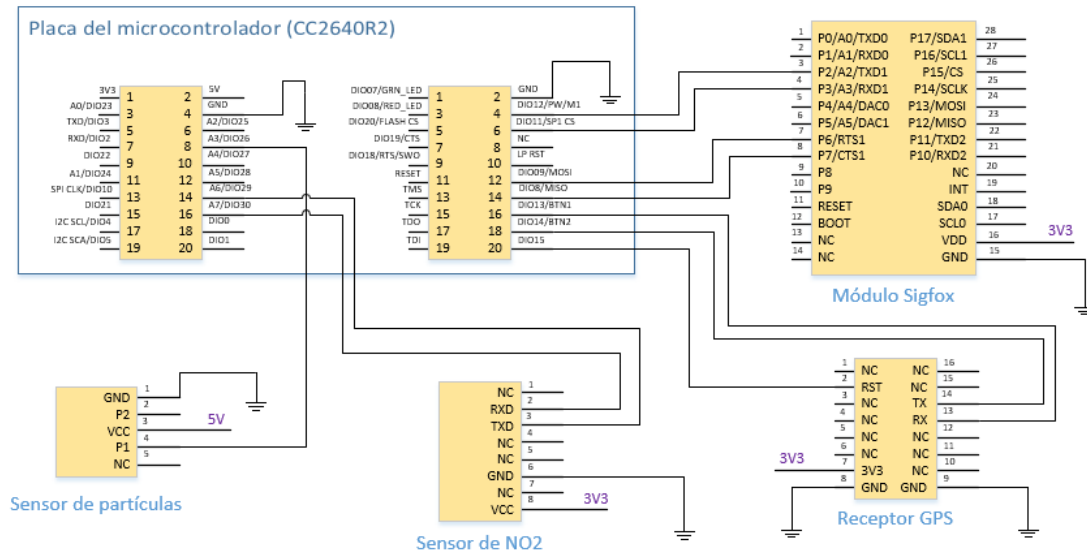


Fig. 3.2 Diagrama esquemático del prototipo del dispositivo de medida

La figura 3.3 muestra el primer prototipo con todos los componentes y sensores conectados.

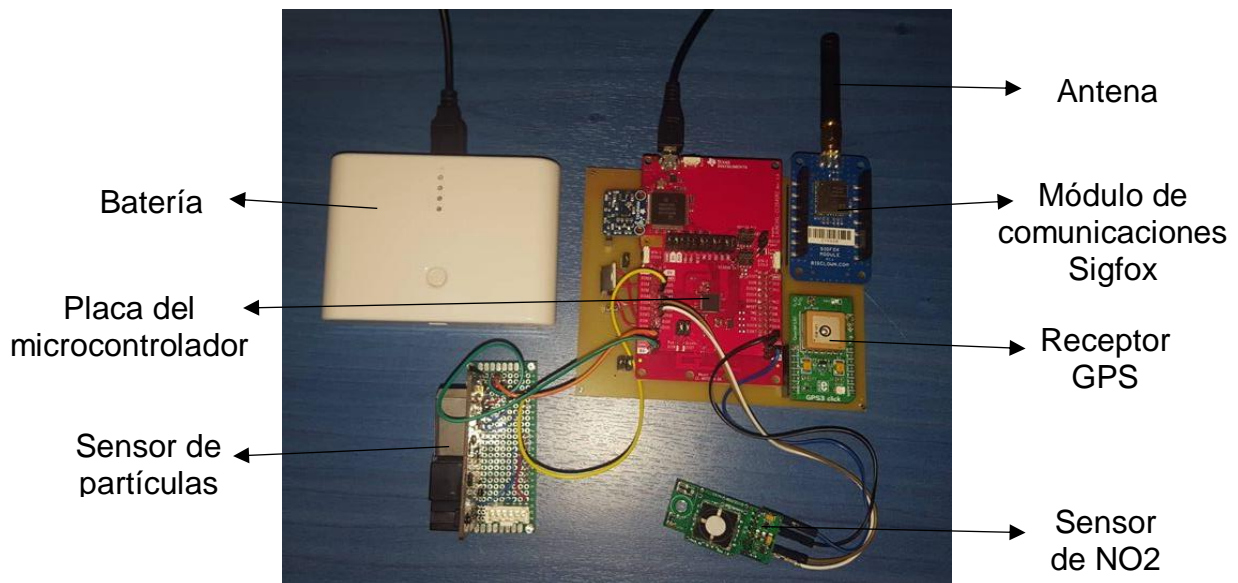


Fig. 3.3 Prototipo del dispositivo de medida

3.2. Hardware del Dispositivo de Medida

Este apartado, contiene todos los componentes que incorpora el prototipo del dispositivo de medida, así como su funcionamiento, adquisición de las medidas y los tests realizados para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo.

3.2.1. Microcontrolador

El microcontrolador [21] es el componente principal del dispositivo de medida. Es el encargado del correcto funcionamiento de todos los elementos del dispositivo de medida. A través del software que se ha programado en el microcontrolador, éste implementa las funcionalidades de adquisición de medidas y transmisión de los datos a la nube.

El microcontrolador realiza todas las tareas configuradas. Una tarea se encarga de activar y desactivar los semáforos para que otra tarea no pueda acceder a una misma variable. Además, contiene todo el procesado que tiene que realizar cada componente.

El microcontrolador nos ofrece distintos periféricos que podemos utilizar para llevar a cabo las diferentes tareas que se necesitan. Uno de los periféricos es la UART, que se encarga de la transmisión de los datos entre los sensores de medida y el microcontrolador. El microcontrolador sólo incorpora una UART, que tendrá que ser compartida por las diferentes tareas. A la UART tienen acceso los componentes externos como el sensor de NO₂, el sensor de partículas, el receptor GPS y el módulo de comunicaciones.

También, usamos los timers que nos ofrece el microcontrolador para hacer que las tareas se activen de forma periódica.

El funcionamiento del software del microcontrolador, lo podemos encontrar más adelante en el apartado 3.3, Software del Dispositivo de Medida.

3.2.2. Sensores

3.2.2.1. *Dióxido de nitrógeno (NO₂)*

El sensor digital de NO₂ que se ha escogido tiene un tamaño de 44.5 x 20.8 x 8.9 mm y un peso muy ligero menor de 56 gramos. Consume 1 mW por cada minuto de toma de muestra y en caso de querer medidas más continuas el consumo sería de 12 mW. Además incorpora una función de standby para poder reducir aún más el consumo. Por lo que tendremos una vida útil del sensor entre 5 y 10 años aproximadamente.

El sensor digital lleva incorporado un kit de desarrollo que hace la conversión ADC y envía los datos a través de la UART en forma digital, así que con el microcontrolador sólo habrá que guardar la variable de las medidas de concentración de gas.

Además del tipo de sensor hay otros parámetros que hemos tenido en cuenta, como que su alimentación no sobrepase el voltaje del microcontrolador, el rango de medidas y su resolución, tiempo de respuesta, consumo, tiempo de vida y peso.

Este sensor se usa en aplicaciones como controles de purificación del aire, detecciones de seguridad industrial y como en nuestro caso, monitoreo de la calidad del aire.

Tiene un rango de funcionamiento de temperatura de -20 a 40 °C y de humedad de 15% a 95%. Además, cumple con la directiva ROHS.



Fig. 3.4 Sensor de NO2

Para que este sensor esté activo, iniciamos una tarea que hará todas las funciones para poder extraer la medida de concentración de gas. Configuramos, abrimos y dejamos la UART en modo lectura para que cuando el sensor envíe la información se pueda leer.

Al ser un sensor digital, el fabricante nos ofrece unos comandos de ejecución que podemos utilizar para realizar las acciones que queremos que el sensor realice, como adquisición de una medida, activar y desactivar el modo standby, configurar las muestras promedio, etc.



Fig. 3.5 Pines sensor de NO2

Los pines 2 y 3 corresponden a recepción (RX) y transmisión (TX) respectivamente, el pin 6 se conecta a masa (GND) y el pin 8 es para alimentar el sensor con una tensión de 2.6 a 3.6 V

Antes de todo, al encender el sensor, debemos esperar un tiempo de estabilización de entre 30 minutos a 1 hora.

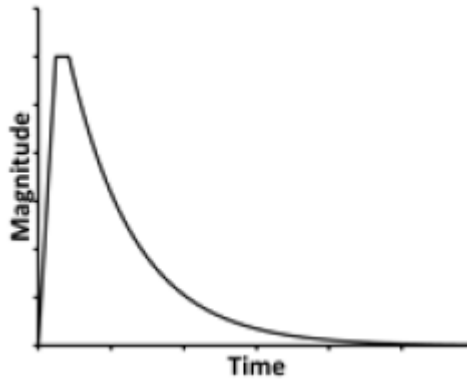


Fig. 3.6 Curva de estabilización del sensor de NO2

Una vez estabilizado, solo la primera vez se tendrá que calibrar con otro comando (Z) para obtener una concentración de NO2 más precisa, esta calibración tendrá lugar en una zona libre de gases, y se ajustará a 0 ppm. Si el dispositivo no se apaga, esta calibración solo se tendrá que volver a realizar en un largo periodo de tiempo.

También debemos elegir y configurar con otro comando (A) la cantidad de muestras que promedie, en este caso, se realizará una medida periódica cada 5 minutos, y la cantidad a promediar recomendada por el fabricante es de 60.

Para que el sensor se ponga en funcionamiento debemos enviarle el carácter ('r') que es el comando para extraer una línea de información del sensor y cuando envíe la información la guardamos en un buffer y hacer parsing con una variable de vectores y poder extraer y guardar las medidas que nos proporciona el sensor.

Consultar datasheet del sensor de NO2, en la referencia [22].

3.2.2.2. *Partículas*

El sensor de polvo está diseñado para detectar la concentración de partículas de polvo en el aire mediante el uso de un método de detección óptica. Contiene un foto-sensor que detecta la luz infrarroja reflejada por las partículas de polvo en el aire.

El sensor de polvo puede detectar y distinguir las pequeñas partículas como el humo del cigarrillo (generalmente de $1\mu\text{m}$) y las partículas grandes de polvo doméstico (generalmente de $20\mu\text{m}$), la salida de la señal es proporcional al tamaño de la partícula y concentración. Con una pequeña protección adicional, el sensor se puede usar al aire libre.

El sensor de polvo debe ir instalado verticalmente en un lugar que no esté afectado por el flujo de aire causado por la rotación del ventilador de algún motor. Se ha de cubrir el agujero central mediante el uso de una esponja negra para no irradiar el sensor óptico de polvo. No se ha de cubrir el agujero inferior y superior para que haya mayor flujo de aire y poder medir el polvo. Además dispone de otros orificios para poder atornillar de forma más fácil el sensor a nuestro dispositivo.

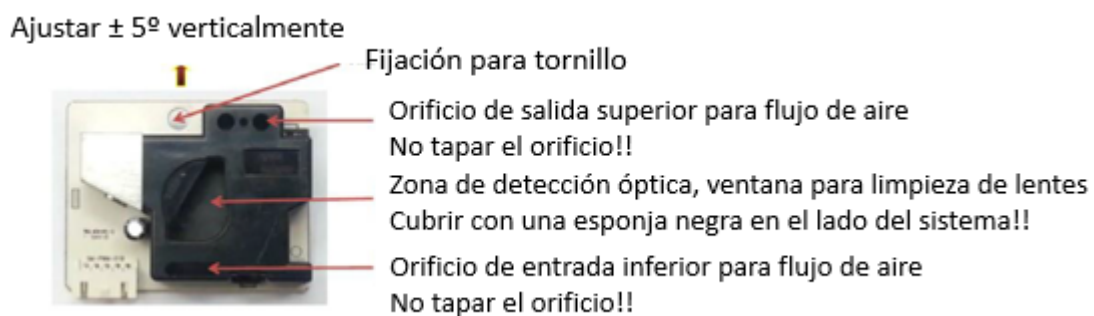


Fig. 3.7 Sensor de partículas

Tiene un tamaño de 59 x 46 x 18 mm y un peso ligero de 20 gramos. Ofrece una salida PWM (modulación por ancho de pulso) donde la información está en el tiempo de pulsos bajos. Es capaz de distinguir pequeñas partículas de humo de cigarrillo de partículas grandes de polvo de casa y obtenemos los resultados a través de 2 salidas. Además, tiene un flujo de aire forzado constante por resistencia del calentador. Y unas ondulaciones de voltaje de suministro de menos de 200 mV, que se pueden reducir si hay otros componentes alimentados a la misma fuente.

Tiene un rango de funcionamiento de temperatura de -10 a 60°C , y necesita un alimentación de -0.3 a $+7\text{V}$. El sensor está fabricado sin plomo y cumple con la directiva ROHS.

Este sensor se usa en aplicaciones como filtrador y purificador de aire, alarmas de incendios, o como en nuestro caso, detección de polvo y monitoreo de la calidad del aire.

En la figura 3.6 vemos las conexiones internas del sensor. Para hacer las conexiones con la placa disponemos de los pines GND, VCC (+ 5 V), y las salidas de impulsos P1 que corresponde a las partículas pequeñas y la salida de impulsos P2 que corresponde a las partículas grandes.

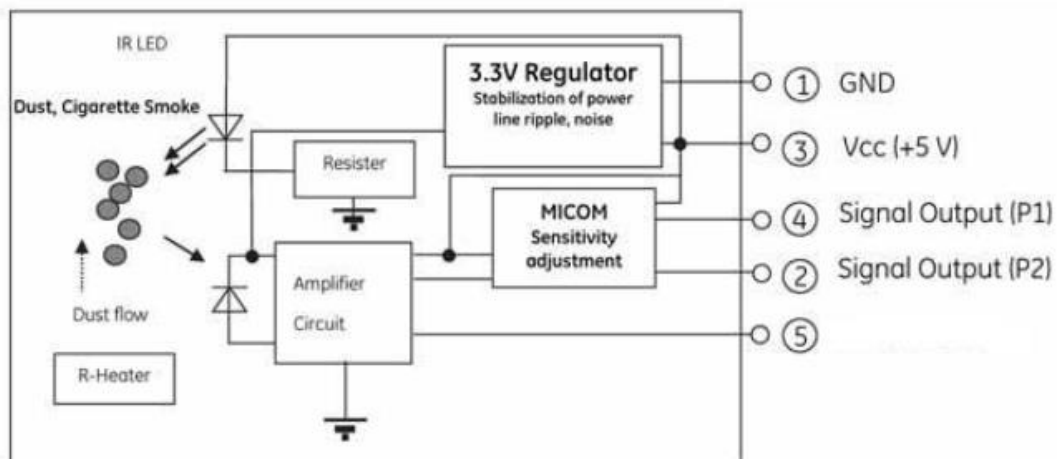


Fig. 3.8 Conexión y pines sensor de partículas

EL sensor de partículas puede distinguir el tipo de polvo, si es de partículas grandes como el polvo de casa o partículas pequeñas como el humo de cigarrillos.

La figura 3.9 muestra un ejemplo para las dos señales de salida. Cuando el sensor detecta una partícula la tensión de salida pasa a 0. Por lo tanto, en una ventana de tiempo de 30 segundos que se ha configurado, se mide el tiempo de tensión baja y se calcula el % de baja ocupación.

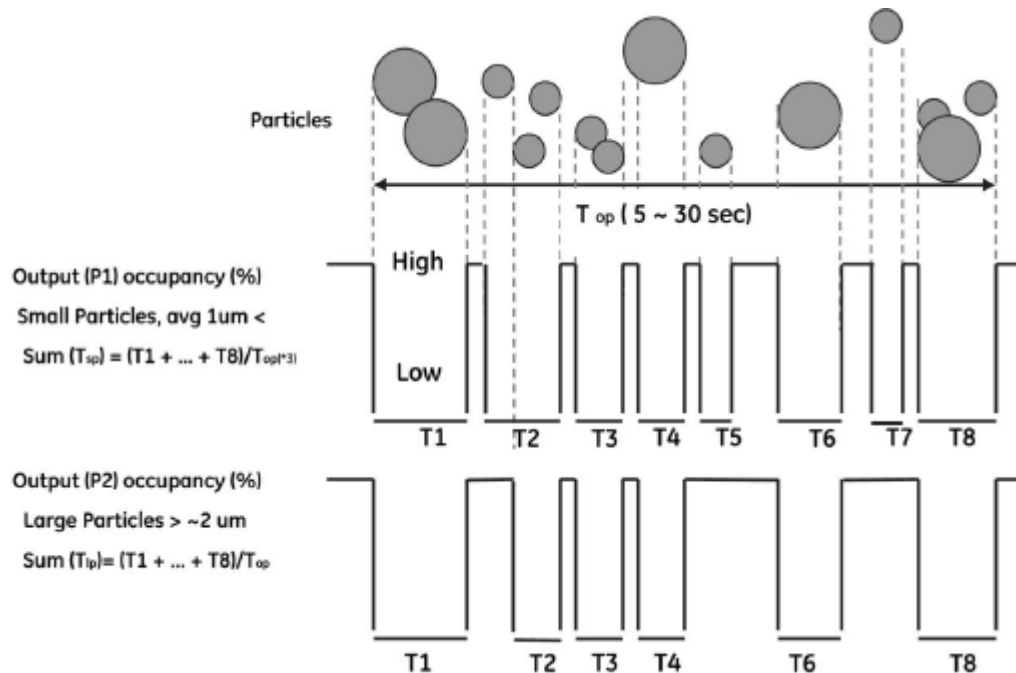


Fig. 3.9 Método de distinción entre partículas

Para medir el tiempo utilizamos diferentes relojes que nos ofrece la placa configurando unos temporizadores, uno que mide la ventana de tiempo y otro reloj en el cual se acumula el tiempo cada vez que se detecta una partícula. Para ello utilizaremos los flancos de subida y bajada de cada señal para medir el tiempo de forma más precisa.

Para comprobar que funcionaba se conectó al osciloscopio y configuramos una señal de entrada conocida para realizar pruebas y ver el funcionamiento.

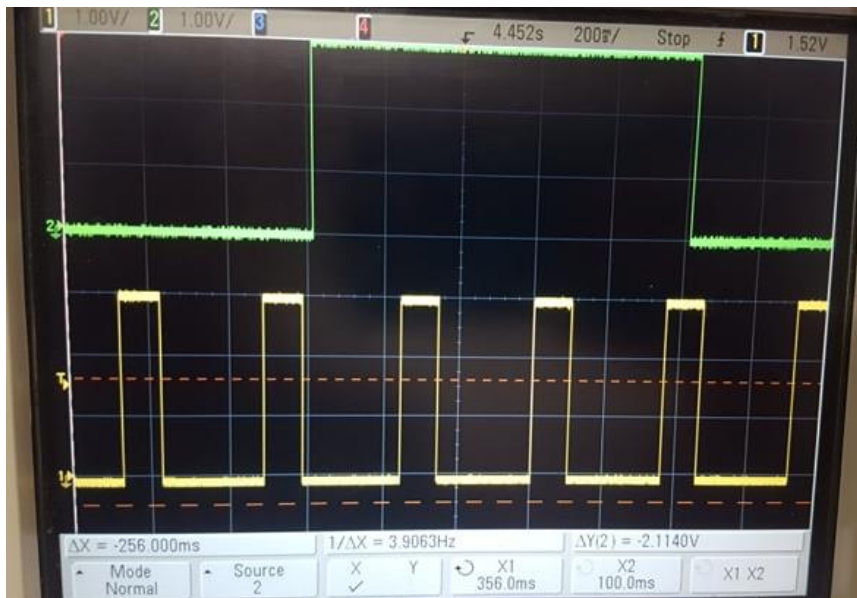


Fig. 3.10 Prueba de funcionamiento del sensor de partículas

A continuación, convertimos el % de baja ocupación con la gráfica que nos proporciona el fabricante en la figura 3.11 y ya obtenemos el valor de concentración de polvo en ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

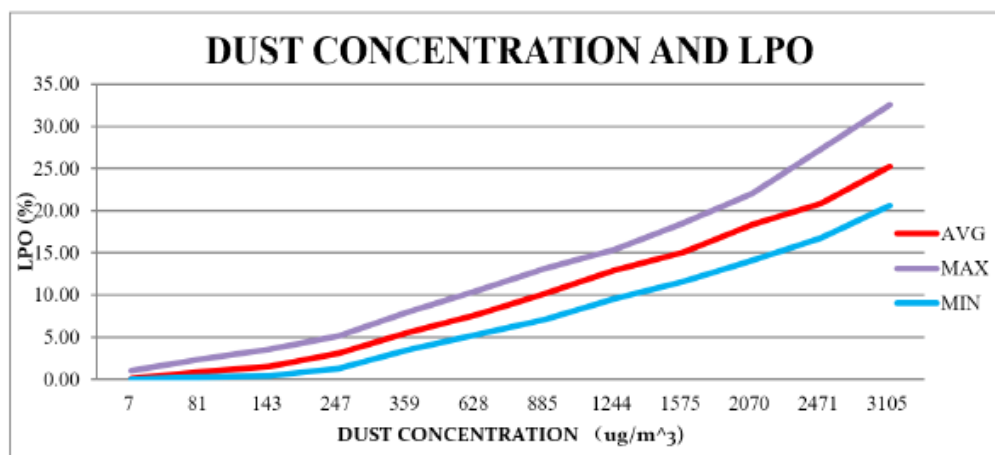


Fig. 3.11 Gráfica de calibración del sensor de partículas

Para convertir el valor utilizamos la ecuación de la recta máxima. Dado que no es una recta muy lineal, se divide la recta en dos para tener mas precisión en la medida. Por lo tanto, la recta 1 sera de los niveles bajos y la recta 2 de los niveles altos de la gráfica.

$$y - y_1 = m(x - x_1) \quad (3.1)$$

Donde: y = Occupancy Low que medimos
 y_1 = Valor minimo conocido de Occupancy Low eje y
 x = Valor de Concentración de polvo
 x_1 = Valor minimo conocido de Concentración de polvo eje x
 m = Pendiende de la recta

Primero se calcula las pendientes de cada recta, con un valor conocido maximo y mínimo de cada eje proporcionado por la gráfica.

$$m_{recta\ 1} = \frac{7.93-0}{350-0} = 0.02265 \quad (3.2)$$

$$m_{recta\ 2} = \frac{7.1-3.5}{850-350} = 0.0105 \quad (3.3)$$

Y aislamos y calculamos el valor de Concentración de polvo con la fórmula de la ecuación de la recta:

$$x = \left(\frac{y-y_1}{m} \right) + x_1 \quad (3.4)$$

Consultar datasheet del sensor de partículas, en la referencia [23].

3.2.2.3. Temperatura

Es necesario saber la temperatura ambiente, ya que esta puede influir en las medidas realizadas por otros sensores. El dispositivo mide la temperatura que nos proporciona el sensor de NO2, este además, también nos proporciona una medida de humedad. Por lo tanto, se ha escogido la medida de temperatura y humedad que nos ofrece el sensor de NO2.

Los rangos de temperatura que podemos llegar a medir van de -40°C a 50°C y la humedad se mide en % de la cantidad de agua o vapor de agua que este en el aire.

3.2.2.4. GPS

Para saber la posición exacta por donde circulamos y adquirimos las medidas, utilizamos un módulo de recepción GPS.

El módulo L80 (Quectel) es ultra delgado de alta sensibilidad con una antena de parche interna. Además, tiene un consumo muy bajo en modo de seguimiento de 20 mA. El módulo es funcional sin una antena externa, aunque el módulo dispone de un conector para añadir una antena externa según la necesidad. Así que cuando la antena externa esta activa, gracias a la tecnología del módulo, ira conmutando entre las dos antenas para mantener la posición durante todo el proceso.

El módulo incorpora un LED rojo que parpadeara indicando que ha realizado una adquisición correcta del satélite. Se ha configurado para que obtenga una adquisición de posicionamiento de latitud y longitud cada minuto. La comunicación con el microcontrolador se hace a través de las líneas mikroBUS UART (RX, TX) y RST. Además, funciona con una fuente de alimentación de 3.3V que va conectado a la placa del dispositivo de medida.

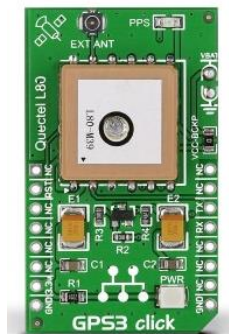


Fig. 3.12 Modulo GPS

Consultar referencia [24] para más información sobre el receptor GPS.

3.2.2.5. Otros

El prototipo se ha probado en un principio para ver como reaccionaba el sensor de partículas y de NO₂. Una vez que vemos cómo se comportan y funcionan, es posible añadir otros sensores que nos permiten saber mejor otras medidas de contaminantes que tiene el aire para saber su calidad.

Estos sensores que se pueden incorporar son:

- Dióxido de azufre (SO₂)
- Ozono (O₃)

Estos sensores tienen las mismas conexiones, forma de extraer la información y el mismo funcionamiento que el sensor de NO₂, siempre que sea del mismo fabricante, por lo que se podrán añadir al dispositivo de medida de manera más fácil y rápida.

3.2.3. Módulo de comunicación

Sigfox es la tecnología que hemos decidido usar en este proyecto para enviar los datos del dispositivo a la nube.

Para poder hacer el envío de datos se utiliza un módulo de Sigfox [25], el cual, hace posible la comunicación del dispositivo al Cloud.



Fig. 3.13 Modulo de comunicaciones Sigfox

Es un módulo de Sigfox certificado oficialmente, de la zona frecuencial de Europa y Medio Oriente, que incorpora una antena (SMA ANT-SS900) para transmitir los datos. Tiene un consumo de energía de espera de 2 μ A y de 65 mA durante aproximadamente 6 segundos durante la transmisión.

Es ligero y con unas dimensiones de 33 x 55 mm. Su tensión de funcionamiento es de 1.8 a 3.6 V y de temperatura de -20 a 70 °C.

La payload máxima que podemos enviar es de 12 bytes, ya que está estructurado de tal forma que cada medida ocupa unos bytes determinados.

En la estructura de la payload encontramos:

- **Tipo y estado (1 byte):** Para saber cuál es el tipo de payload que enviamos e información adicional como el estado de la batería.

- **NO2 concentration (2 bytes):** Variable con la medida de concentración del gas NO2 en ppb, obtenida por el sensor de gas NO2.
- **Temperatura (1 byte):** Variable con la medida de temperatura en °C, obtenida por el sensor de gas NO2.
- **Humedad (1 byte):** Variable con la medida de la humedad en %, obtenida por el sensor de gas NO2.
- **Dust concentration (1 byte):** Variable con la medida de concentración de polvo en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, obtenida por el sensor de partículas.
- **Latitud (3 bytes):** Variable con la adquisición de posición de la latitud obtenida por el GPS.
- **Longitud (3 bytes):** Variable con la adquisición de posición de la latitud obtenida por el GPS.

3.2.4. Coste del Prototipo del Dispositivo de Medida

Todos los componentes electrónicos seleccionados son pequeños y ligeros. En la siguiente tabla veremos los precios para estimar el valor de un prototipo experimental del dispositivo de medida, sin incluir la batería.

Tabla 3.1. Precios de dispositivos

Dispositivos	Modelo	Proveedor	Precio
Placa del microcontrolador [21]	LAUNCHXL-CC2640R2	Digi-Key	25,70 €
Sensor digital de NO2 [26]	DGS NO2 968-043	SPEC SENSORS	63,73 €
Sensor de partículas [27]	SM-PWM-01C	Digi-Key	12,65 €
Módulo GPS [25]	L80-M39 (Quectel)	MikroElektronika	37,40 €
Módulo Sigfox [25]	WSSFM10R1AT (Wisol)	BigClown	19,00 €
Antena [28]	ANT-SS900	Mouser Electronics	3,60 €
Total			162,08 €

El precio se podría llegar a reducir hasta un 35% del precio unitario, dependiendo de las cantidades de los pedidos, el precio irá disminuyendo. Pudiendo llegar a un precio unitario de unos 105 € con IVA, pero sin contar los gastos de envío.

3.3. Software del Dispositivo de Medida

El software del dispositivo se almacena en la memoria del microcontrolador. El software del dispositivo de medida se ha desarrollado sobre el RTOS de Texas Instruments, denominado TI-RTOS.

En el dispositivo se definen las variables, los pines a utilizar donde conectamos los componentes, se inician los distintos drivers y creamos las estructuras de los semáforos y eventos del resto de tareas. También, se llaman a las funciones de los otros componentes para que realicen su tarea.

El software se ha estructurado en diversas tareas que implementan las funcionalidades del dispositivo:

- Tarea del sensor de NO₂:

Se encarga de obtener las medidas de concentración de gas, la temperatura y la humedad del sensor de NO₂. En esta tarea configuramos el tiempo periódico de obtención de medidas. Cuando el temporizador acaba se inicia un evento que se encarga de procesar las medidas en forma digital que obtenemos del sensor. Para procesar la información se envía el carácter ('r') que es el comando para extraer una línea de información del sensor y cuando envíe la información la guardamos en un buffer y hacer parsing con una variable de vectores y poder extraer y guardar las medidas que nos proporciona el sensor para poderlas transmitir.

- Tarea del sensor de partículas:

Se encarga de obtener las medidas del sensor de partículas. En esta tarea configuramos el tiempo periódico de obtención de las medidas del sensor de partículas. Cuando el temporizador acaba se inicia un evento que se encarga de procesar las medidas. Debido al funcionamiento del componente se utilizan 2 temporizadores, uno para medir la ventana de tiempo y otro que acumula el tiempo cada vez que se detecta una partícula. Para ello se utiliza los flancos de subida y bajada de cada señal. Después, se procesan los resultados según las indicaciones del fabricante para extraer una medida de concentración de partículas.

- Tarea del receptor GPS:

Se encarga de obtener el posicionamiento del receptor GPS. En esta tarea configuramos el tiempo periódico de obtención del posicionamiento. Cuando el temporizador acaba se inicia un evento que se encarga de procesar las medidas del receptor GPS para poder ser transmitidas.

- Tarea del módulo de Sigfox:

Se encarga de obtener las variables de todas las anteriores tareas para poder ser transmitidas a través de Sigfox. Se define la estructura de la payload a enviar a través de la red de Sigfox. Para preparar la payload se accede a las variables de cada tarea y se definen en la estructura de la payload. Después, cuando se crea el evento se hace el envío al Cloud a través de la red de Sigfox.

Durante el proceso de todas las tareas, se habilitan y deshabilitan semáforos, ya que sólo existe una única UART y todas las tareas deben compartir modo de transmisión de los datos entre el microcontrolador y todos los componentes externos conectados.

3.4. Tests

Se han realizado una serie de tests para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores NO₂ y de partículas, para que estén calibrados y ver su estabilidad. Los tests que se han realizado han consistido en las siguientes campañas de medida:

- **Test de 1 hora:** test en estático cerca de una estación de medidas de referencia conocida para comparar sus medidas con las medidas del prototipo del dispositivo de medida.
- **Test de 24 horas:** test en estático en un lugar alejado de la estación de referencia para comprobar el funcionamiento de los sensores en un intervalo largo de tiempo.
- **Test de coche:** test en movimiento para comprobar el funcionamiento de los sensores cuando cambian de zona y llevan cierta velocidad.
- **Test de estabilidad:** test para comprobar el tiempo que tarda el sensor de NO₂ en estar estable y así poder aceptar las medidas como correctas.
- **Test de Stanby:** test para comprobar la estabilidad y el funcionamiento cuando hacemos duty-cycling, es decir, alimentar y tomar medidas periódicamente de forma que el sensor permanezca en standby durante largos intervalos de tiempo (entre medidas consecutivas) para reducir el consumo energético.

3.4.1.1. Test de 1 hora

En la figura 3.14 vemos los primeros resultados de la campaña de medidas del sensor de NO₂. Estas medidas se han realizado cerca de una estación de referencia de Viladecans. Obtenemos un promedio de 4.66 ppb (8.77 µg/m³), comparando con la estación de referencia a la misma hora, obtiene 10 µg/m³, vemos el correcto funcionamiento y estabilidad del sensor de NO₂.

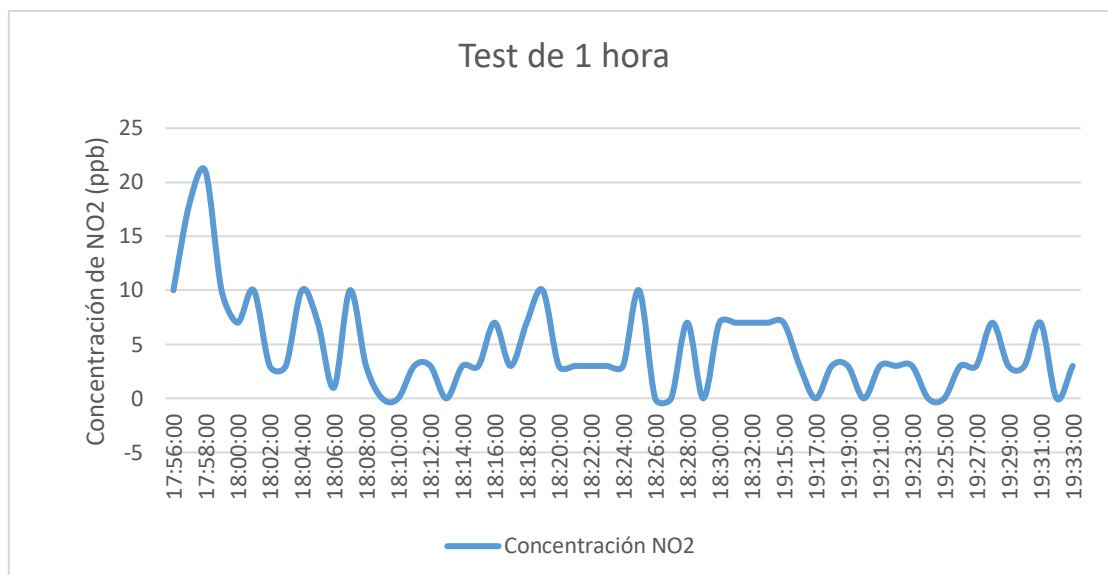


Fig. 3.14 Test de 1 hora: Concentración NO2

Para el sensor de partículas obtenemos los resultados de la figura 3.15. Vemos como las medidas obtenidas no son tan estables como lo esperado. El promedio de la concentración es de $353 \mu\text{g}/\text{m}^3$, un valor muy elevado de los niveles permitidos, pero en este caso la estación de referencia no nos ofrece un valor de comparación.

Al realizar más test sobre la concentración de partículas y detectar que los resultados no eran los correctos y seguían dando niveles muy elevados a los permitidos, se probó a cambiar la configuración del sensor, como continuaba dando resultados negativos, se optó por deshabilitar el sensor y desarrollarlo más a fondo en líneas de trabajo futuras.

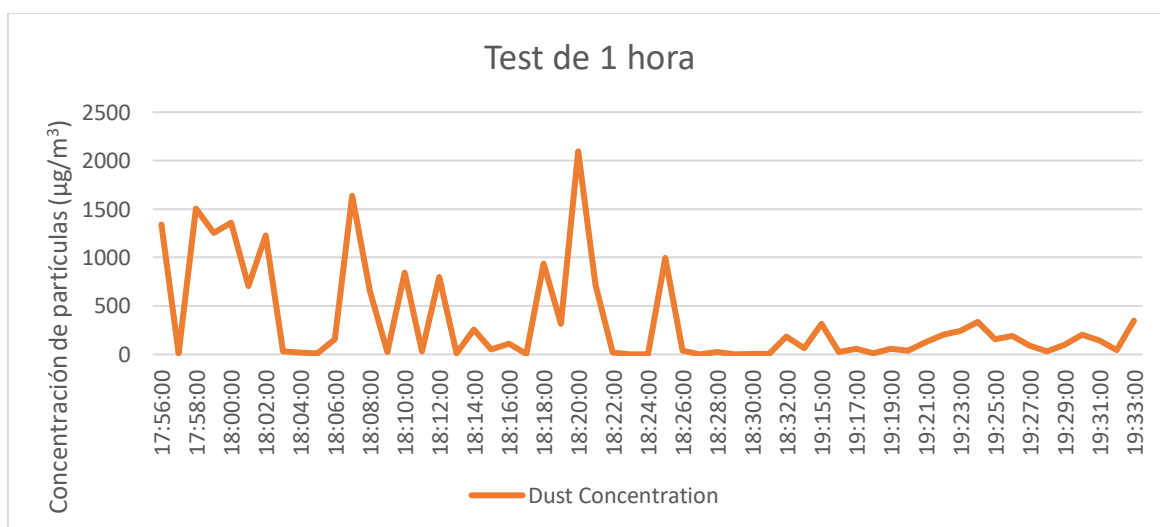


Fig. 3.15 Test de 1 hora: Concentración de partículas

3.4.1.2. Test de 24 horas

En la figura 3.16 vemos los resultados obtenidos en una campaña de medida realizada durante 24 horas, en una zona más alejada (1 Km) de la estación de referencia pero realizadas en Viladecans. Obtenemos un promedio de 15.17 ppb ($28.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Y la estación de referencia un promedio de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Comparando las dos medidas en una gráfica, vemos que las medidas tienen niveles muy parecidos a las mismas horas y que siguen el mismo patrón. El color rojo del dispositivo, vemos un parón de las medidas por problemas de alimentación y que una vez resuelto el problema, se vuelven a coincidir con un pequeño delay y con niveles de concentración algo menores.

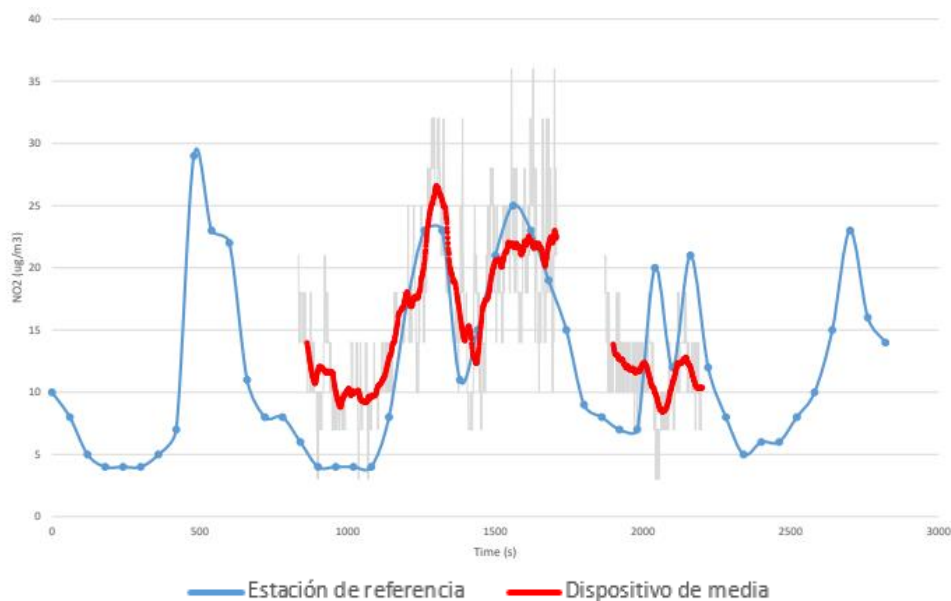


Fig. 3.16 Test de 24 horas: Concentración NO₂ vs Estación de referencia

Con este análisis se comprueba el correcto funcionamiento del sensor y su estabilidad y fiabilidad.

3.4.1.3. Test de coche

En la figura 3.17 vemos los resultados de los tests en movimiento realizados en coche. En este primer test vemos que el sensor se vuelve inestable, mirando los niveles de temperatura comprobamos que son elevados. Y detectamos que hay un problema de variabilidad en las medias, es decir, que cambian mucho el valor de la concentración en muy poco tiempo.

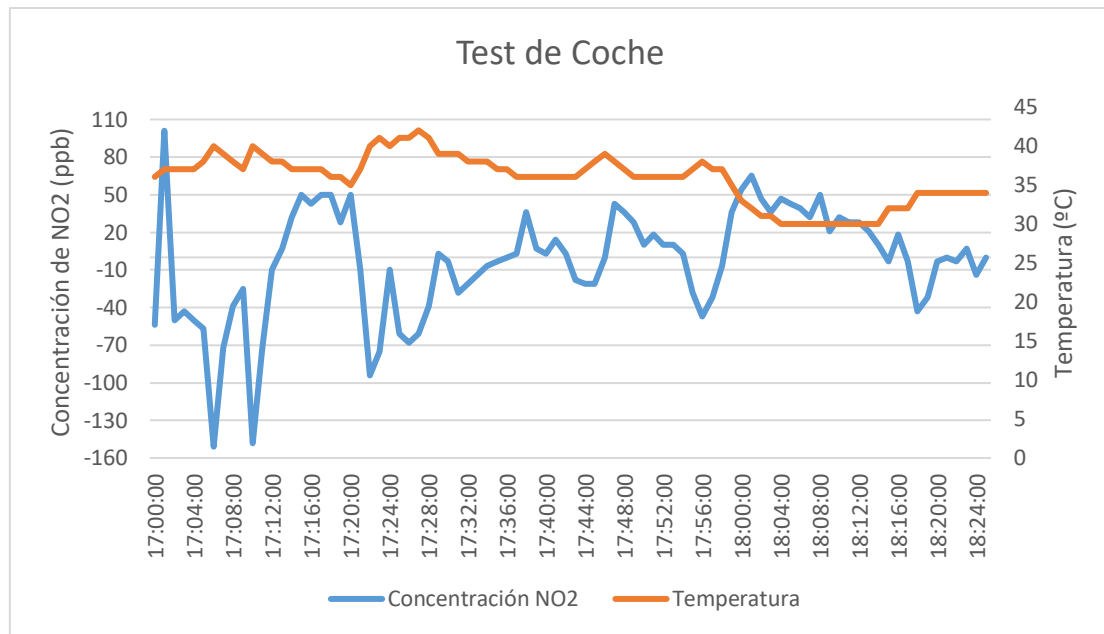


Fig. 3.17 Primer Test de Coche

El segundo test de coche, comprobamos en la figura 3.18, que una vez el sensor se ha estabilizado, ya no se comporta como el primer test de coche y que funciona de una forma más estable. Comprobamos que a partir de la zona estable obtenemos un promedio de 19 ppb ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y las estaciones de referencia un promedio de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Un valor un poco más elevado, pero debemos tener en cuenta que realizamos las medias en movimiento.

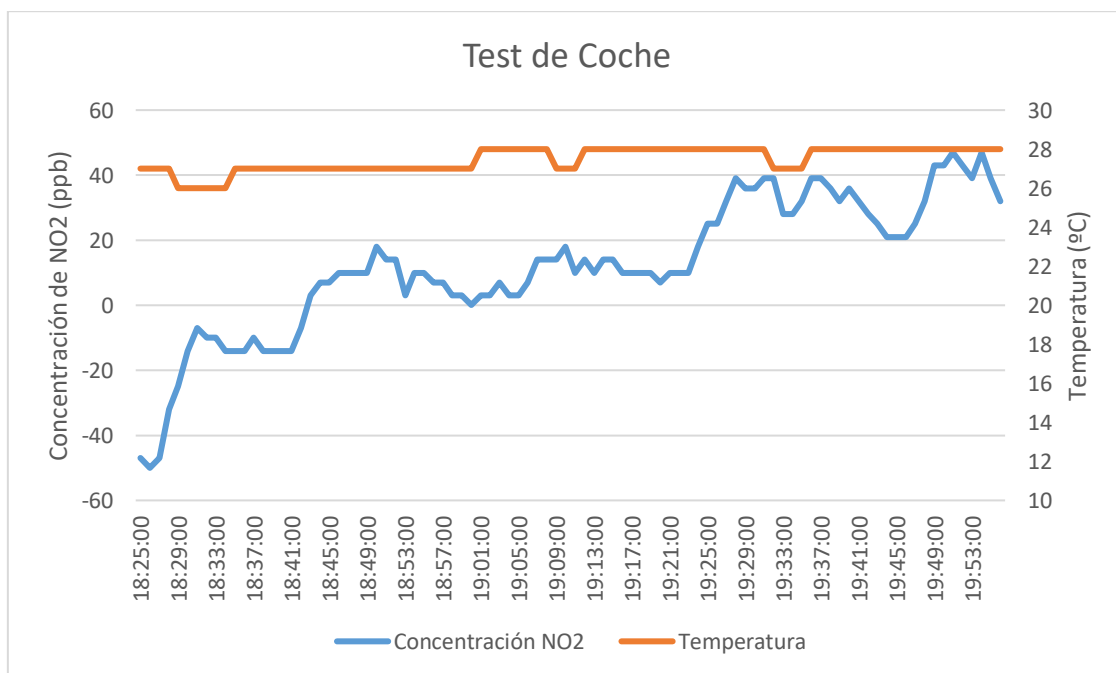


Fig. 3.18 Segundo Test de Coche

En la figura 3.19, se realiza el tercer test de coche. Se comprueba que cuando la temperatura aumenta el sensor se vuelve inestable. Este test no podemos realizar una comparación con las estaciones de referencia, ya que hemos realizado pruebas en entornos de parking o donde hay más concentración de vehículos para determinar si en esas zonas los niveles aumentaban.

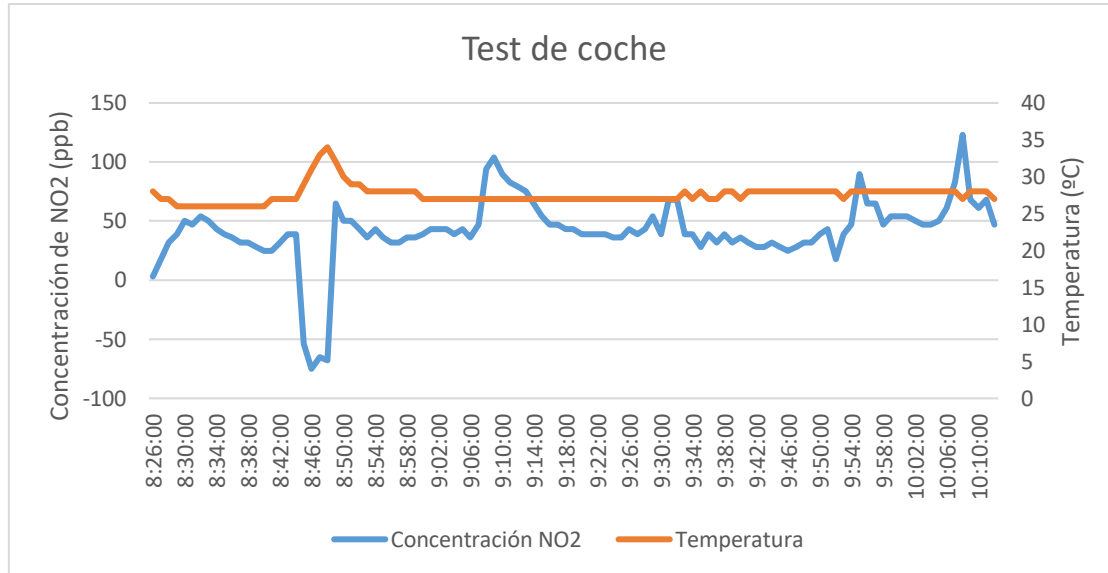


Fig. 3.19 Tercer Test de Coche

3.4.1.4. Test de estabilidad

En la figura 3.20, vemos el tiempo que tarda el sensor en estabilizarse después de una semana apagada. Comprobamos la curva de estabilización que muestra el fabricante, y que recomienda un tiempo de estabilización de entre 30 minutos a 1 hora aproximadamente. Para este caso, la estabilización tarda 35 minutos a mostros niveles aceptables de medias de concentración de NO2.

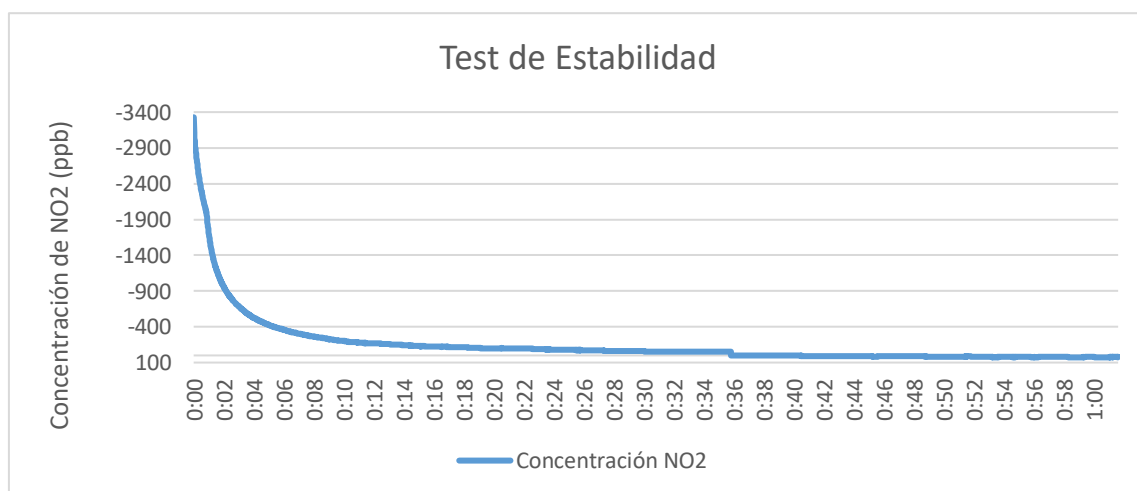


Fig. 3.20 Test de Estabilidad: dispositivo apagado 1 semana

En la figura 3.21, vemos el tiempo que tarda el sensor en estabilizarse después de 24 horas apagado. Al ser menos tiempo de inactividad del sensor que el test anterior, la estabilización tarda unos 25 minutos en mostrar niveles aceptables de concentración de NO₂. Aunque ya estaría estable es mejor dejar el tiempo recomendado por el fabricante para conseguir medidas más fiables.

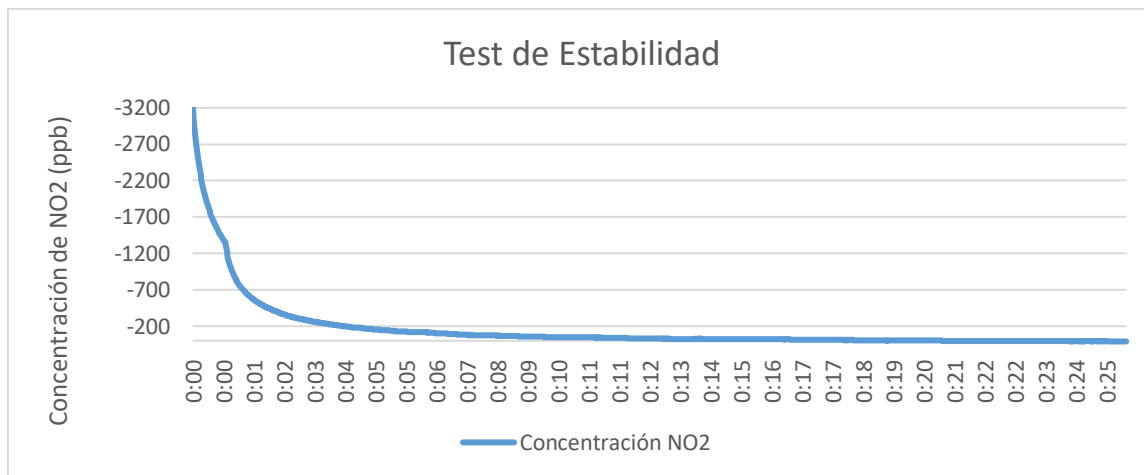


Fig. 3.21 Test de Estabilidad: dispositivo apagado de 24 horas

3.4.1.5. *Test de Standby*

El dispositivo en modo Standby tarda unos 2 minutos en volver a estabilizarse. Por lo tanto, cuando se adquiere una medida se activa el Standby y se vuelve a desactivar 2 minutos antes de volver a realizar una nueva medida para que el sensor vuelva a estar estable. Como esta información no se sabía hasta preguntar al fabricante, los tests realizados en modo standby no se han tenido en cuenta.

3.4.1.6. *Estaciones de referencia*

Para realizar todos los tests, se han comparado las mediciones obtenidas con las estaciones de referencia de Viladecans y Gavá. Las medidas de estas estaciones los podemos consultar a través de la página de la Generalitat de Catalunya [16].

- Estación de referencia de Viladecans:

Se encuentra en una zona suburbana en la Av. Josep Tarradellas, s/n situada dentro del recinto del Atrium que mide diversos contaminantes.



Fig. 3.22 Campaña de medidas en la estación de Viladecnas

- Estación de referencia de Gavá:

Se encuentra en una zona suburbana situada en el Parc del Mil·leni (c. de la Llenya - c. de l'Aigua) que mide diversos contaminantes.



Fig. 3.23 Campaña de medidas en la estación de Gavá

3.5. Almacenamiento en el Cloud

A través del backend de Sigfox, configuramos el backend para que envíe un mensaje HTTP POST hacia otra dirección IP, para que una vez recibido un mensaje procedente del dispositivo de medida, lo reenvíe a la máquina donde está instalado el Node-RED y así guardar los datos en la base de datos.

Para almacenar los datos usamos la herramienta Node-RED con una interfaz muy sencilla, que permite tener una programación basada en flujo para aplicaciones IoT. Así que, con el editor de flujos, arrastraremos los nodos necesarios y conectándolos entre sí para crear un flujo que ofrezca el servicio que queremos.

El flujo total que hemos creado es el siguiente:

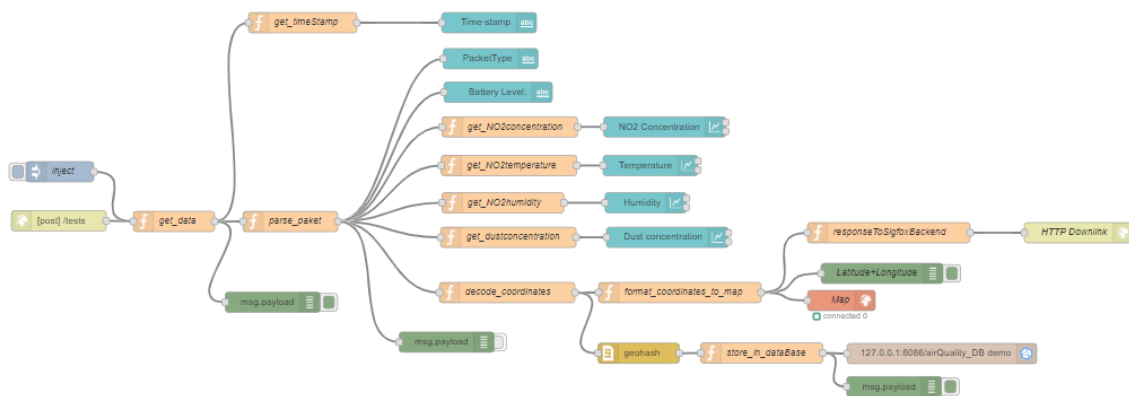


Fig. 3.24 Flujo del sistema de monitorización

La interfaz se divide en la paleta de nodos disponibles que podemos utilizar, donde tenemos las diferentes opciones como entradas, salidas, funciones, tablas y gráficas, etc. Y el editor, que arrastrando los nodos de la paleta y conectándolos, creamos el flujo de servicio, que en nuestro caso será la de guardar los datos en una base de datos. Accediendo a cada nodo, nos permite configurarlos y programarlos en JavaScript.

Los flujos de Node-RED, se almacenan en formato JSON.

3.5.1. Diseño de base de datos

Una vez nos llegan las payloads al Node-RED en formato Hexadecimal y con los 12 bytes que hemos enviado, tenemos que crear un flujo con los nodos para tener el servicio de guardar los datos en la base de datos.

Primero añadimos un nodo con un input configurado con HTTP POST, el cual está pendiente de recibir el mensaje que hemos reenviado del backend de Sigfox.

Conectamos y configuramos los nodos de funciones para extraer los datos y guardarlos en las variables que formaran nuestra base de datos.

Para comprobar las medias en tiempo real añadimos unos nodos de visualización, en el cual podemos ver en una gráfica el comportamiento de cada medida.

También, añadimos un nodo de localización geohash, el cual descodifica los valores de latitud y longitud y crea un código que podemos utilizar para referenciar las medidas en el mapa.

Además, añadimos y configuramos los nodos para guardar los datos en la base de datos en formato JSON y poder reenviarlos a otra dirección, donde estará Grafana para visualizar los datos.

Por último, añadimos dos nodos extras para realizar pruebas y comprobar que el flujo funciona correctamente. Un nodo llamado “inject” al principio que alimenta al flujo con un ejemplo de la payload conocida para ver su comportamiento. Y nodos de salida “debug” que nos permite ver el mensaje de la payload allí donde lo ubicamos.

Para más información sobre Node-RED consultar referencia [29].

3.6. Visualización

Para la visualización de las medidas utilizaremos Grafana, que es una plataforma de visualización y análisis para todo tipo de métricas, mostrando los valores en gráficas y mapas para poder analizar mejor y de forma más precisa las medidas que se han obtenido.

Realizando una consulta a la base de datos donde están almacenadas las medidas nos permite consultar, visualizar y analizar mejor las medidas, también permite añadir umbrales y alertas para comprender mejor los resultados y poder actuar de una forma u otra.

Primero, configuramos la dirección y el nombre de la base de datos, del cual, haremos las consulta de todos los valores.

Después, ya podemos ir añadiendo paneles que es la forma de visualización de los datos, se pueden añadir tablas, graficas, mapas, alertas, etc. Para cada panel se tiene que hacer la consulta, accediendo a la base de datos para que nos muestre los valores.

Para ver cómo se comportan las medidas, se ha creado una gráfica y un mapa, donde resulta muy fácil analizar los datos, ya que podemos interactuar con las

gráficas y mapas, mirando así, un intervalo de tiempo concreto o una zona determinada del mapa.

Para ver un ejemplo vemos una campaña de medidas en estático, donde se muestran todos los resultados obtenidos:

Para más información sobre Grafana consultar referencia [30].

- Resultados de las medidas de concentración NO₂:

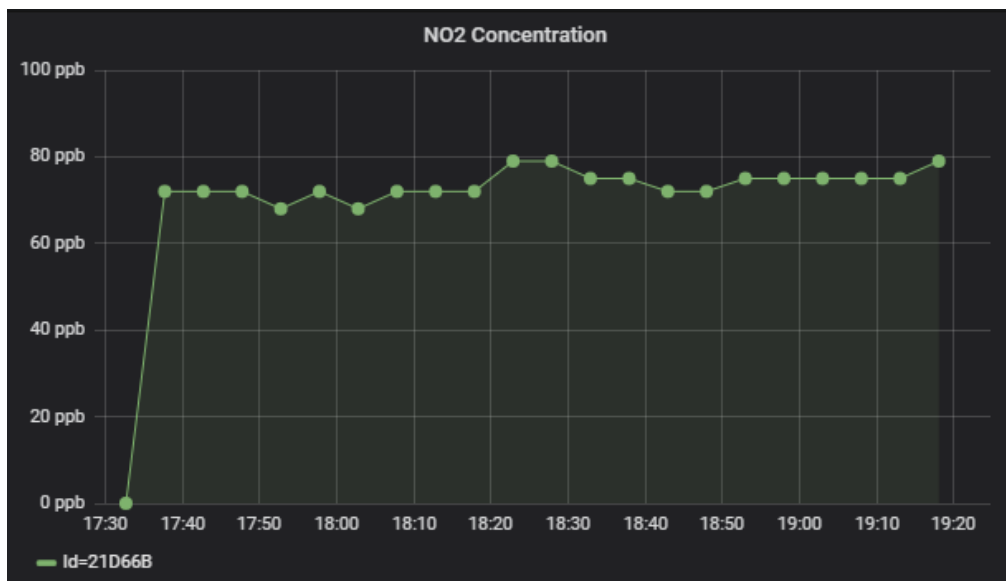


Fig. 3.25 Gráfica de concentración de NO₂

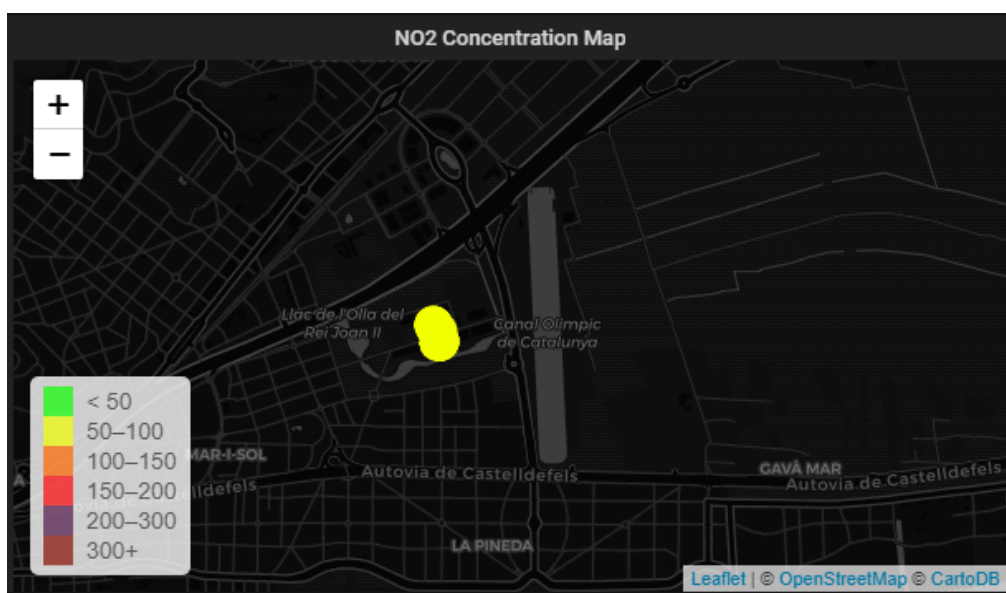


Fig. 3.26 Mapa de concentración de NO₂

- Resultados de medidas de temperatura:

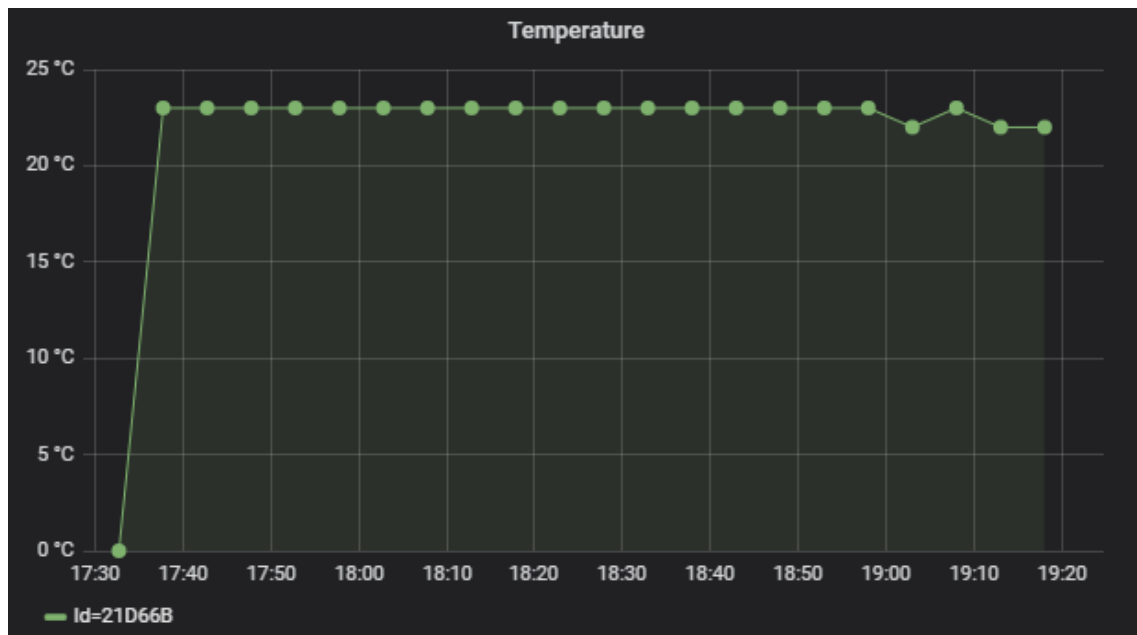


Fig. 3.27 Gráfica de temperatura

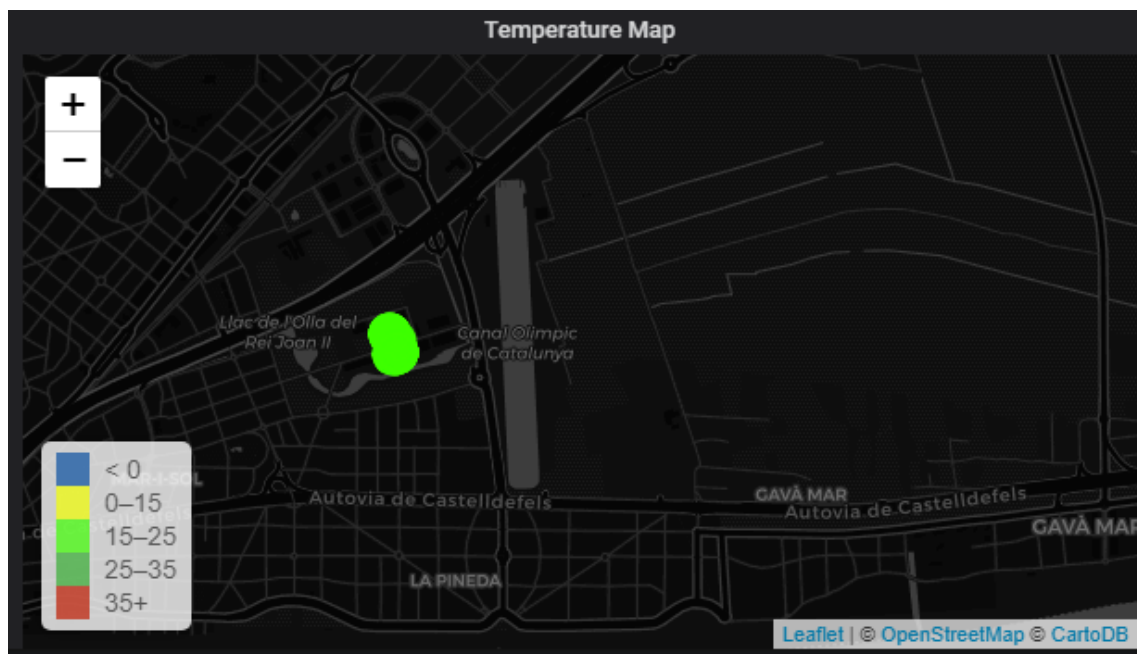


Fig. 3.28 Mapa de temperatura

- Resultados de medidas de humedad:

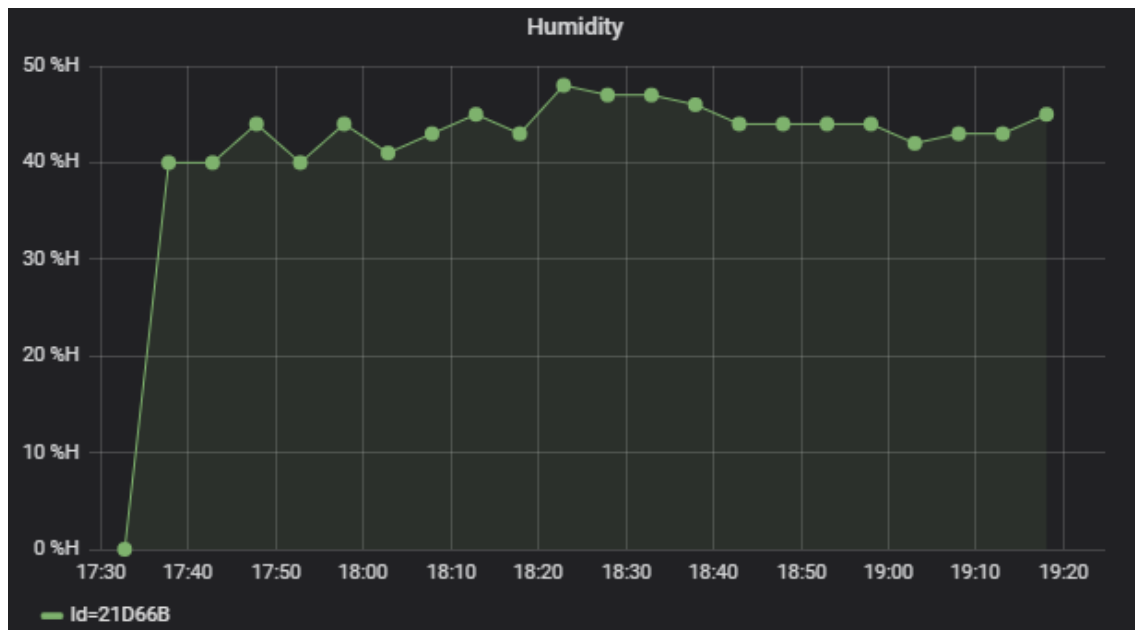


Fig. 3.29 Gráfica de humedad

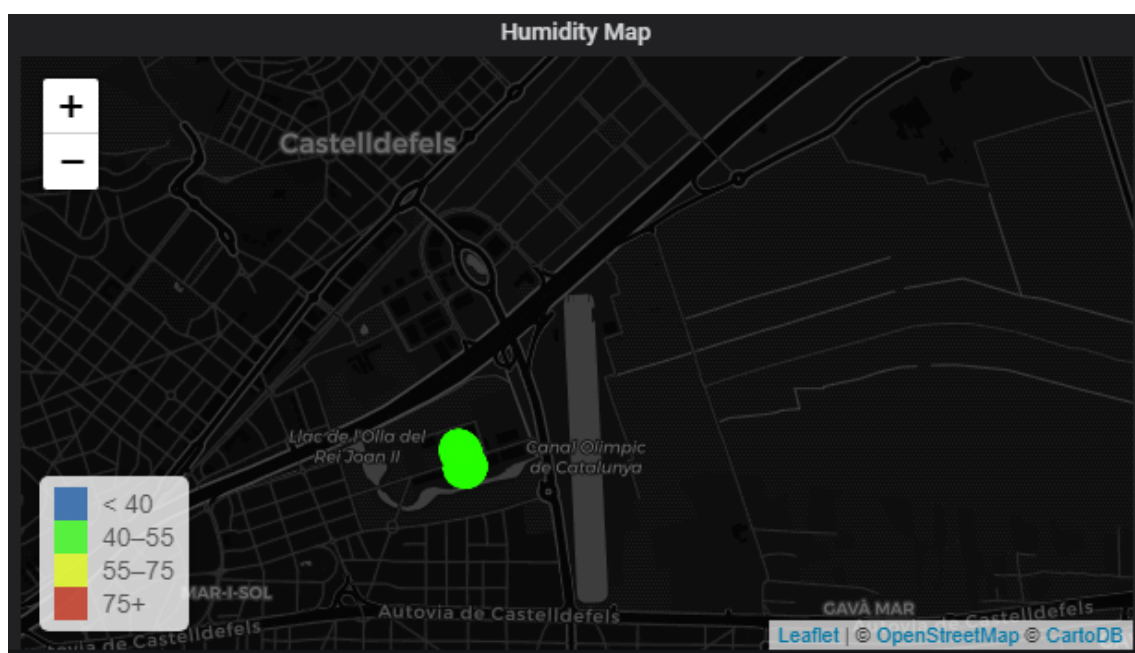


Fig. 3.30 Mapa de humedad

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones del trabajo

El objetivo principal del trabajo consistía en desarrollar un sistema de monitorización de la calidad del aire, capaz de adquirir medidas de concentración de gases y partículas, transmitir la información vía radio a la nube y almacenar y visualizar los datos.

Una de las primeras conclusiones que obtenemos al acabar el primer prototipo experimental, es que para ser un dispositivo de bajo coste, se ha conseguido tener un sistema que puede generar mapas de calidad y obtener gráficas de los diferentes sensores para su posterior análisis.

Para el caso del sensor de NO₂, una vez calibrado, comprobamos su precisión y estabilidad comparando las medidas obtenidas con las estaciones de referencia. Pero para que el sensor sea estable y fiable, una vez encendido necesita un tiempo de estabilidad de entre 30 minutos a 1 hora.

Para el sensor de partículas, hemos tenido problemas de estabilidad, ya que en las mediciones los datos fluctuaban demasiado y las medias en algunos casos no tenían demasiado sentido, ya que eran muy superiores a los niveles permitidos. Por eso, en este proyecto se ha optado por deshabilitarlo, pero seguir utilizando la medida para el envío para futuros avances con este sensor

EL GPS de posicionamiento nos proporciona gran precisión en la localización de la medida, en entornos amplios adquiere de forma rápida señal de los satélites para obtener la posición al aire libre pero en entornos con calles más estrechas el GPS podría llegar a fallar.

La tecnología de las comunicaciones inalámbricas, Sigfox, para este proyecto funciona correctamente, pero nos limita bastante la cantidad de mensajes enviados por día, con lo que en los test de campañas en algunos casos se ha excedido para conocer el funcionamiento del sistema.

El rendimiento de las bases de datos y las nuevas aplicaciones basadas en web como Grafana, son una solución óptima para presentar los resultados a los habitantes de cualquier ciudad.

4.2. Líneas de trabajo futuras

A pesar de los resultados preliminares, el proyecto aún se encuentra en sus fases iniciales, pudiendo ofrecer aún muchos avances y mejoras.

Como se ha comentado, el dispositivo solo se ha probado con el sensor de Dióxido de Nitrógeno (NO₂), por lo tanto, aún podemos añadir los diferentes sensores que nos permiten saber mejor la calidad del aire.

Habría que trabajar más en profundidad en el funcionamiento del sensor de partículas, para que nos muestre las medidas lo más estables posibles y así aportar más datos de la calidad del aire.

Habría que buscar otras alternativas para el envío de medias, ya que como hemos comentado, no es compatible con nuestros requisitos. Una de las alternativas que mejor se podría aplicar, es la tecnología NB-IoT, donde tendríamos mayor posibilidad de configuración en el tiempo de transmisiones.

También se podrían crear alertas de las medidas, es decir, que cuando los valores superen el umbral que es perjudicial para las personas, nos llegue un aviso en forma de mensaje, para estar avisados y saber cómo actuar.

Averiguar la forma de descargar los datos de la aplicación web, para posibles personales técnicos, que quieran analizar los resultados de una forma más avanzada y profesional.

Finalmente, habría que comprobar la escalabilidad del sistema, es decir, en el caso de tener cientos de dispositivos, como de eficaz es el sistema y la forma que tendría la visualización de datos.

CAPÍTULO 5. GLOSARIO

μ/m^3	micrograms per cubic meter (microgramos por metro cúbico)
$^{\circ}C$	Degree Celsius (Grados Celsius)
ADC	Analog to digital Converter (Conversor Analogico a Digital)
Bps	Bits per second (Bits por segundo)
CRC	Cyclic Redundancy Check (Verificación por redundancia cíclica)
GIS	Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite)
GPRS	General Packet Radio Service (Servicio general de paquetes vía radio)
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
GSM	Global System for Mobile communications (Sistema Global para las comunicaciones móviles)
HTTP POST	Hypertext Transfer Protocol (Protocolo de Transferencia de Hipertexto)
INS	Inertial Navigation System (Sistema Inercial de Navegación)
IoT	Internet of Things (Internet de las cosas)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Bandas reservadas para uso no comercial)
JSON	JavaScript Object Notation (Notación de Objeto de JavaScript)
LED	Light Emiting Diode (Diodo Emisor de Luz)
LoRaWan	Long Range Wide Area Network (Red de área amplia de largo alcance)
LPWA	Low Power Wide Area networks (Red de Area Amplia de Baja Potencia)
LTE	Long Term Evolution (Evolución de la norma 3GPP UMTS)
NB-IoT	Narrowband IoT (Banda Estrecha IoT)
NO	Nitrogen Oxide (Óxido de Nitrogeno)
NO ₂	Nitrofen Dioxide (Dióxido de Nitrógeno)
O ₃	Ozone (Ozono)
PM ₁₀	Particulate Matter 10 (Partículas en suspensión inferiores a 2,5 micras)
PM _{2,5}	Particulate Matter 2.5 (Partículas en suspensión inferiores a 2,5 micras)
Ppb	Parts per billion (Partes por billón)
Ppm	Parts per million (Partes por millón)
PWM	Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulsos)
RAM	Random Access Memory (Memoria de acceso aleatorio)
RTOS	Real Time Operating System (Sistema Operativo en Tiempo Real)
RX	Reception (Recepción)
SO ₂	Sulfur dioxide (Dióxido de Azufre)
SQL	Structured Query Language (Lenguaje de consulta estructurada)
TX	Transmission (Transmisión)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter (Transmisor Receptor Asincrono Universal)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (Sistema universal de telecomunicaciones móviles)

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Proyecto Citi-Sense-MOB, (2018). <http://www.citysense.es/>
- [2] Proyecto OpenSense, (2018). <http://opensense.epfl.ch>
- [3] Proyecto Respira, (2014).
http://liferespira.com/laymans_report_life+respira.pdf
- [4] Proyecto BAM, (2018),
<http://www.environmenthamilton.org/view/page/BAM>
- [5] [M. E. Parés](#), [F. Vázquez-Gallego](#), [C-AQM: A crowdsourced air quality monitoring system](#), Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., October 2018, Delft. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-491-2018>
- [6] Embedded systems: introduction to Arm Cortex (TM) – M microcontrollers. Volume 1, pp. 69-94, Jonathan W. Valvano (2014)
- [7] RTOS - Embedded systems, (2018).
http://www.sase.com.ar/2011/files/2010/11/SASE2011-Introduccion_RTOS.pdf
- [8] LPWA, (2018). <http://www.teldat.com/blog/es/lpwa-nb-iot-bajo-coste-mayor-cobertura-bajo-consumo/>
- [9] Sigfox, (2018). <https://www.sigfox.com>
- [10] LoRaWan, (2018). <http://lorawan.es/>
- [11] Cobertura LoRaWan, (2018).
<https://www.casadomo.com/2018/05/31/la-plataforma-libelium-amplia-cobertura-lorawan-llega-la-india>
- [12] NB-IoT, (2018). <https://accent-systems.com/es/nb-iot/>
- [13] Cobertura NB-IoT, (2018). <http://www.agendaempresa.com/94002/red-nb-iot-vodafone-llega-municipios-mas-25-000-habitantes/>
- [14] Calidad del aire, (2018). <https://www.eltiempo.es/calidad-aire/barcelona>
- [15] Índices de calidad del aire, (2018).
https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/caire/informes/MANUALES/ES/IT_31_CALCULO_DO_ICA.pdf

- [16] Generalitat de Catalunya, (2018). <http://dtes.gencat.cat/icqa/>
- [17] Comunidad de Madrid, (2018). http://gestionaria.madrid.org/azul_internet/html/web/5.htm?ESTADO_MENUS=5
- [18] Temperatura, (2018). <http://dle.rae.es/?id=ZQ9rRqa>
- [19] Humedad relativa, (2018). <http://dle.rae.es/?id=KoBWInL>
- [20] Receptor GPS, (2018). <https://www.coordenadas-gps.com/sistema-de-coordenadas>
- [21] Placa LAUNCHXL-CC2640R2, (2018). <https://www.digikey.es/product-detail/es/texas-instruments/LAUNCHXL-CC2640R2/296-45488-ND/6821070>
- [22] Datasheet sensor digital de NO₂, (2018). https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-NO2-968-043_9-6-17.pdf
- [23] Datasheet sensor de partículas, (2018). <https://www.mouser.es/datasheet/2/18/AAS-930-185B-Telaire-SMART-Dust-Sensor-090517-web-1369152.pdf>
- [24] Módulo GPS, (2018). <https://www.mikroe.com/gps-3-click>
- [25] Módulo de Sigfox, (2018). <https://shop.bigclown.com/sigfox-module/>
- [26] Sensor digital de NO₂, (2018). <https://www.spec-sensors.com/product/digital-gas-sensor-module-no2/>
- [27] Sensor de partículas, (2018). <https://www.mouser.es/ProductDetail/Amphenol-Advanced-Sensors/SM-PWM-01C?qs=XxkmzOjxSRX%252bvAsshneW2A%3D%3D>
- [28] Antena, (2018). <https://www.mouser.es/ProductDetail/LPRS/ANT-SS900?qs=RtU67MWp17DJvTMcikoK6Q%3D%3D>
- [29] Node-RED, (2018). <https://nodered.org/>
- [30] Grafana, (2018). <https://grafana.com/>